



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ENERGETICKÝ ÚSTAV

ENERGY INSTITUTE

**NÁVRH A KONSTRUKCE PRŮHLEDNÉ TRYSKY PRO
VIZUALIZACI A MĚŘENÍ VNITŘNÍHO PROUDĚNÍ**

DESIGN AND CONSTRUCTION OF TRANSPARENT NOZZLE FOR VISUALIZATION AND MEASUREMENT
OF THE INTERNAL FLOW

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Marcel Sapík

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

doc. Ing. Jan Jedelský, Ph.D.

BRNO 2016

Zadání bakalářské práce

Ústav: Energetický ústav
Student: **Marcel Sapík**
Studijní program: Strojírenství
Studijní obor: Základy strojního inženýrství
Vedoucí práce: **doc. Ing. Jan Jedelský, Ph.D.**
Akademický rok: 2015/16

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma bakalářské práce:

Návrh a konstrukce průhledné trysky pro vizualizaci a měření vnitřního proudění

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Charakter proudění v rozprašovacích tryskách ovlivňuje chování kapaliny na jejím výstupu a výsledný sprej. Předmětem práce je návrh a konstrukce modelu tlakové vířivé trysky, který bude později sloužit pro vizualizaci a použití optických metod (studium charakteru vnitřního toku a chování vzdušného jádra, měření rychlostního profilu, tloušťky filmu apod.). Při návrhu modelu je nutno respektovat zákony geometrické optiky, požadavky na pevnost, snadnou vyrobitelnost a modularitu.

Cíle bakalářské práce:

- seznámení se s problematikou (tlakové vířivé trysky, vnitřní proudění + experiment ve zvětšeném měřítku, vizualizační a optické metody, specifika lomu světla v optických soustavách)
- rešerše publikovaných řešení
- variantní návrhy modulárního řešení pro konkrétní TVTsO, nutno zohlednit: tvar předlohy, vhodnost pro vizualizaci a použití optických metod, pevnost, aplikaci tlakových sond, modulární řešení s možností variace tvaru a rozměrů jednotlivých částí, technologičnost konstrukce
- výkresová dokumentace, 3D výkresy pro prezentaci

Seznam literatury:

DURDINA, L. Measurement of Spray Characteristics Using Optical Measurement Methods. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2012. 81 s. Vedoucí diplomové práce Ing. Jan Jedelský, Ph.D.
https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=53388

Lefebvre AH. Atomization and sprays. Combustion, vol. xi. New York: Hemisphere Pub. Corp.; 1989. p. 421.

SMITS, A. J. a LIM, T. T. Flow Visualization: Techniques and examples. London: Imperial College Press, 2003. ISBN 1-86094-193-1.

http://www.worldscientific.com/doi/pdf/10.1142/9781848160361_fmatter

Vamvakoglou. K., Investigation of the Flow Pattern within and at the Exit of a Pressure Swirl Atomizer, MSc Dissertation, Dept. Mech. Eng., UMIST, 1996.

DeKeukelaere. H.J.K., The Internal Flow in a Swirl Atomizer Nozzle, MSc Dissertation, Dept. Mech. Eng., UMIST, 1995.

Zmeškal Oldřich, Základy obrazového inženýrství, VUT v Brně, 2005,

http://www.fch.vutbr.cz/~zmeskal/obring/prednasky_2005/02_geometricka_optika.pdf

Ma, Z., "Investigation on the Internal Flow Characteristics of Pressure-swirl Atomizer" Ph.D. Thesis, University Of Cincinnati, Department of Aerospace Engineering and Engineering Mechanics of the College of Engineering, 2001.

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2015/16

V Brně, dne

L. S.

doc. Ing. Jiří Pospíšil, Ph.D.
ředitel ústavu

doc. Ing. Jaroslav Katolický, Ph.D.
děkan fakulty

Abstrakt

Tato práce se zabývá návrhem a konstrukcí průhledné trysky ke zkoumání vnitřního proudění kapalin. Cílem byl návrh možných řešení konstrukce a následné vypracování výkresové dokumentace pro umožnění samotné výroby. V teoretické části jsou popsány základy atomizace včetně vlastností kapalin a popisuje základní optické metody pro vnitřní proudění v trysce. V rešeršní části je vybráno několik konstrukčních řešení, kterými je inspirována výsledná podoba trysky. Její konstrukce je rozpracována v poslední části, ta obsahuje popis postupu, výrobní výkresy i obrazovou dokumentaci včetně 3D modelu.

Klíčová slova

atomizace, tryska, vnitřní proudění, plexisklo, sprej, vířivý, 3D model, modulární

Abstract

This thesis deals with design and construction of transparent nozzle for research of internal flow of liquids. The objective was to design potential construction of the nozzle and make a manufacturing drawing. The theoretical part deals with basics of atomization including properties of liquids and describes basic optical methods for internal flow in a nozzle. In the research part of this thesis, a number of construction solutions has been picked to serve as an inspiration for the final shape of the nozzle. Its construction is elaborated in the last part along with a description of the process, a manufacturing drawing, and a visual documentation with a 3D model.

Keywords

atomization, nozzle, atomizer, internal flow, perspex, spray, swirl, 3D model, modular

Bibliografická citace

SAPÍK, M. *Návrh a konstrukce průhledné trysky pro vizualizaci a měření vnitřního proudění*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2016. 46 s. Vedoucí bakalářské práce doc. Ing. Jan Jedelský, Ph.D.

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem svou bakalářskou práci na téma „Návrh a konstrukce průhledné trysky pro vizualizaci a měření vnitřního proudění“ vypracoval samostatně s použitím odborné literatury a pramenů, uvedených na seznamu, který tvoří přílohu této práce.

25. května 2016

.....
Marcel Sapík

Poděkování

Hlavní poděkování patří doc. Ing. Janu Jedelskému, Ph.D. za vedení bakalářské práce, jeho připomínky a trpělivost.

Práce vznikla za přispění projektu GA15-09040S, který finančně podpořila Grantová agentura České republiky a projektu NETME CENTRE PLUS (LO1202) za finančního přispění Ministerstva školství, mládeže a tělovýchovy v rámci účelové podpory programu „Národní program udržitelnosti I“.

Dále bych chtěl poděkovat Ing. Davidu Škaroupkovi, Ph.D. za ochotu při tvorbě a tisku 3D modelu. Velké díky patří rodině za neutuchající podporu a trpělivost při studiu a Janě za to, že je vždy při mně.

Obsah

Úvod	12
1 Základy atomizace	13
1.1 Atomizace	13
1.2 Vlastnosti kapalin	14
1.2.1 Hustota kapaliny.....	14
1.2.2 Viskozita kapaliny.....	15
1.2.3 Index lomu světla.....	15
1.2.4 Povrchové napětí.....	16
1.3 Požadavky na trysky	16
2 Klasifikace trysek	17
2.1 Tlakové trysky	17
2.1.1 Tryska s jednoduchým otvorem (Plain Orifice).....	18
2.1.2 Jednoduchá tryska (Simplex)	18
2.1.3 Tryska s obtokem (Spill-return)	19
2.2 Konstrukce jednoduché trysky a trysky obtokem.....	20
3 Vnitřní proudění a optické metody pro jeho zkoumání.....	21
3.1 Vysokorychlostní kamera	21
3.2 Fázová Dopplerovská anemometrie (PDA)	22
3.2.1 Laserová Dopplerovská anemometrie (LDA).....	22
3.3 Metoda PIV (Particle Image Velocity)	24
3.3.1 Stereoskopické PIV (SPIV).....	25
4 Rešerše konstrukcí průhledných trysek	26
4.1 Horvay a Leuckel (1984, 1986)	27
4.2 Cooper, Chinn a Yule (1999).....	28
4.3 Rashid, Hamid, Sheng a Ghaffar (2012).....	29
4.4 H. J. K. De Keukelaere (1995).....	30
4.5 Feggeler, Landwehr a Walzel (2006).....	31
5 Plexisklo (PMMA)	32
5.1 Extrudované PMMA	32
5.2 Lité PMMA	32
5.3 Porovnání litého a extrudovaného PMMA	32
6 Vlastní návrh trysky a výsledky práce	33
6.1 Prvotní návrhy.....	33
6.2 Rozpracování návrhu	34
6.3 3D model trysky.....	40
7 Závěr	42
 Seznam použitých zdrojů.....	 43
Seznam použitých symbolů a zkratek.....	45
Seznam příloh	46

Úvod

Snaha o snižování a omezování emisí, zvyšování účinnosti a šetrné zacházení se zdroji se stala trendem dnešní doby. Ať už se jedná o hledání nových typů paliv do spalovacích motorů, nebo dokonce nový pohonný koncept. Příkladem je představení¹ elektromobilů značky TESLA v půlce dubna letošního roku.

S touto problematikou úzce souvisí mimo jiné i rozprašování kapalin, což je pojem, který by mnoho lidí slyšelo poprvé. Pravdou však je, že s rozprašováním kapalin přicházejí do styku denně. Pod pojem „sprej“ si již dokáží představit základní děj atomizace, a sice rozklad původně celistvé kapaliny na drobné kapičky. Deodoranty a antiperspiranty ve spreji, parfémy, čisticí prostředky, to jsou věci, které každý člověk viděl a někdy použil. Ovšem atomizace kapalin nachází svůj hlavní užitek především ve strojírenství, například v podobě vstřikování a rozprašování paliva u spalovacích motorů.

Právě výzkum v oblasti atomizace může pomoci. Kromě ekologického aspektu může práce přinést zjištění ohledně nejvhodnější geometrie a provozních vlastností trysky pro docílení co nejlepšího spreje. Lepší a jemnější sprej znamená lepší smíchání se vzduchem, a tím účinnější spalování, což vede ke snížení spotřeby paliva, omezení emisí a vyšší účinnosti motoru. Důraz na kvalitu spreje má tak aspekty jak ekologické, tak ekonomické.

Cílem této práce bylo navržení konstrukce modulární průhledné trysky s obtokem (spill-return), příprava dokumentace včetně návrhových výkresů a vytvoření modelů pro 3D tisk a prezentační účely. Dalším cílem byla rešerše publikovaných řešení a stručný popis základů atomizace.

Průhlednost ovlivňuje kromě technologických postupů při výrobě (kvalita obrábění, broušení, leštění, aj.) také vlastní konstrukce a materiál. Plexisklo je materiálem dobře obrobitelným a poskytujícím vysokou průhlednost. Pro potřeby měření je důležité dosáhnout stejného indexu lomu kapaliny a plexiskla. Pokud by této podmínky nebylo dosaženo, docházelo by k odrazům a lomům světelných paprsků optických přístrojů, a měření by byla znehodnocena nebo zatížena vysokou měrou nepřesnosti.

Kromě vlastností kapaliny je třeba vyřešit konstrukci. Tryska by při složitějších tvarových prvcích byla obtížně vyrobitelná a opracovatelná. Hrany nebo osazení by při sestavování byly další stěnou, kterou musí paprsek projít. Konstrukce by byla zatížena nepřesností rozměrů a docházelo by k dalšímu lámání paprsků, protože mezi jednotlivými díly by vznikla mezera.

Samotnou modularitu trysky lze vyřešit několika způsoby, kdy každý má určitou nevýhodou. Kombinací několika řešení bylo dosaženo modulární konstrukce maximálně vhodné pro měření vnitřního proudění pomocí optických metod.

¹ DVOŘÁK, F. *Tesla má nový model, rok a půl před startem výroby jich prodala 130 tisíc*. In: Auto.idnes.cz [online]. April 1, 2016 [vid. 2016-04-02]. Dostupný z http://auto.idnes.cz/tesla-model-3-cyv-/ak_aktual.aspx?c=A160401_094120_ak_aktual_fdv

1 Základy atomizace

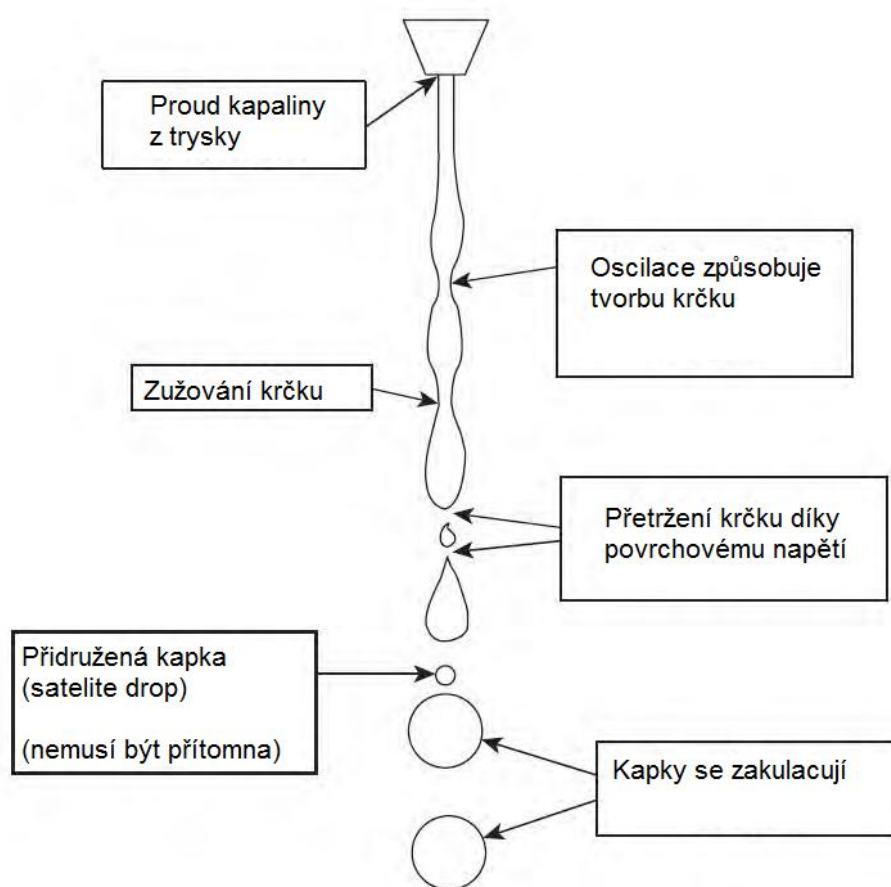
Atomizace je proces, při kterém dochází k přeměně masy kapaliny v malé kapky. Atomizaci najdeme v mnoha odvětvích lidské činnosti. Využití nachází např.:

- Spalovací motory
- Sušení rozprašováním
- Chlazení
- Lékařství
- Aerosoly
- Barvy
- Čištění a čisticí prostředky

Existuje několik způsobů jako například rozprašování mechanické, elektrostatické, aerodynamické a další [2]. Základní součást, která umožňuje rozpad kapaliny do malých kapek, se nazývá tryska.

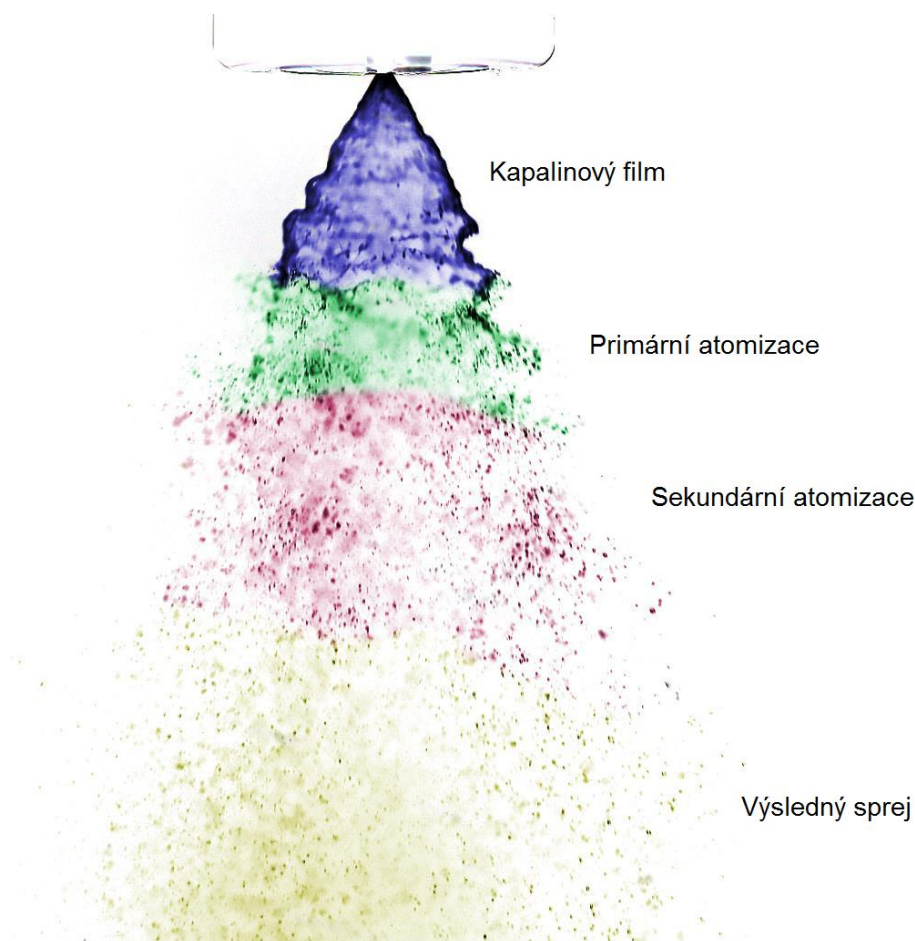
1.1 Atomizace

Proces atomizace můžeme rozdělit do dvou hlavních dějů – *primární atomizace*, kdy se proud kapaliny rozpadá do více svazků a velkých deformovaných kapek. Tento děj probíhá těsně za otvorem trysky a je kromě okolního media závislý také na vnitřním proudění kapaliny v trysce.



Obr. 1.1: Rozpad kapek z tlakové trysky při malé rychlosti, převzato z [3]

Navazuje *sekundární atomizace*, při které dochází k rozbíjení provazců a velkých kapek z primární atomizace na mnohem menší kapky. Děje se tak za interakce s okolním médiem (nejčastěji vzduchem), kdy aerodynamické síly, které na kapku působí, překonávají sílu kohezní, což způsobuje rozpad. Tyto interakce poté určují výsledné vlastnosti spreje [3].



Obr. 1.2: Postupná atomizace reálné kapaliny, převzato z [4]

Před primárním a sekundárním rozpadem dochází u tlakových vířivých trysek vlivem poklesu tlaku kapaliny k tvorbě vzdušného jádra (viz obr. 3.1), které se šíří od ústí trysky až k zadní stěně. Toto je způsobeno tím, že rychlost a tlak kapaliny je nejvyšší po okrajích a směrem ke středu ztrácí tlak, teoreticky až na nulu. V tu chvíli dojde k tvorbě jádra. Více v kap. 2.

Atomizaci lze ovlivnit provozní kapalinou, například použitím kapalin s vysokou nebo nízkou viskozitou, ale také typem geometrie trysky. Vliv kapaliny a geometrie je v současnosti předmětem zkoumání. K tomuto účelu slouží průhledné trysky, skrze jejichž stěny lze pozorovat charakter vnitřního proudění a jeho vliv na výsledný sprej.

1.2 Vlastnosti kapalin

Jedním z mnoha faktorů ovlivňujících rozprašování kapaliny je kapalina samotná. Mezi její důležité vlastnosti patří:

1.2.1 Hustota kapaliny

Hustota kapaliny ρ_k je definována jako hmotnost objemové jednotky kapaliny a popisuje ji vztah:

$$\rho_k = \frac{m_k}{V_k} \quad 2.1$$

kde m_k odpovídá hmotnost kapaliny a V_k je objem kapaliny.

1.2.2 Viskozita kapaliny

Viskozitu lze popsat jako vnitřní tření v kapalině. V podstatě se tedy jedná o odpor kapaliny proti tečení. Podle Newtonova zákona platí pro tečné napětí na stěně elementárního hranolku o výšce „dn“ vztah [5]:

$$\tau = \mu \cdot \frac{dv}{dn} \quad 2.2$$

kde μ je dynamická viskozita a $\frac{dv}{dn}$ je derivací rychlosti.

Druhou viskozitou, kterou rozlišujeme je kinematická, která je definovaná:

$$\nu = \frac{\mu}{\rho} \quad 2.3$$

Kde μ je dynamická viskozita a ρ hustota kapaliny.

1.2.3 Index lomu světla

Pro měření vnitřního toku průhledné trysky je index lomu kapaliny velice důležitý. V ideálním případě by měla mít kapalina index lomu materiálu trysky, aby nedocházelo k lomům světla mezi rozhraními, což by zkreslovalo měření a znehodnocovalo pokusy.

Mezi základy optického zobrazení patří tzv. *zákony geometrické optiky*, které popisují chování světelného paprsku dopadající na rozhraní dvou prostředí.

Prvním zákonem popisujícím chování paprsku, je *zákon odrazu světla*. Na rozhraní prostředí dochází k částečnému nebo úplnému odrazu paprsku, který zůstává v rovině dopadu (tvořena kolmicí k rozhraní v místě dopadu a dopadajícím paprskem).

$$\alpha = \alpha' \quad 2.4$$

Platí, že úhel dopadu α je roven úhlu odrazu α' . Oba úhly leží mezi kolmicí k rozhraní a paprskem.

Druhý se nazývá *zákon lomu světla* nebo také *Snellův zákon*. Pokud na rozhraní nedojde k úplnému odrazu, přechází paprsek částečně do druhého prostředí a dochází k jeho lomu a to buď ke kolmici, nebo od kolmice [6]. Platí základní vztah:

$$\frac{\sin \alpha}{\sin \beta} = \frac{n_2}{n_1} = n_{21} \quad 2.5$$

Kde α je úhel dopadu, β úhel lomu, konstanty n_1 a n_2 jsou indexy lomu prostředí a n_{21} je relativní index lomu.

Oba tyto zákony lze shrnout tzv. *Fermatovým principem*:

Světelný paprsek se šíří tak, aby vzdálenost mezi dvěma body urazil za co nejkratší čas.

1.2.4 Povrchové napětí

Povrch kapaliny se chová jako tenká pružná blána, která uzavírá objem do tvaru nejnižší energetické hladiny (koule) a brání průniku vnějších sil do tohoto objemu [7]. Lze jej definovat jako:

$$\sigma = \frac{F}{l} \quad 2.6$$

Kde F je síla působící na povrch kapaliny a l je délka povrchu.

Definici povrchového napětí lze také vyjádřit jako poměr energie povrchu a jeho plochy.

$$\sigma = \frac{dE_A}{dA} \quad 2.7$$

Kde dE_A představuje změnu povrchové energie a dA plochu je síla působící na povrch kapaliny a l je délka povrchu.

1.3 Požadavky na trysky

Trysky, jako zařízení umožňující atomizaci kapaliny, využíváme například ve spalovacích motorech, ve kterých vstřikují palivo připravené pro smíchání se vzduchem. Z důvodů vysoké přesnosti vstřikování a z toho vycházející dobré účinnosti, nízkých emisí a dalších požadavků je na trysku kladeno mnoho nároků. Několik z nich sepsal Lefebvre v [3].

- poskytovat dobrou atomizaci v širokém rozpětí průtoků
- rychle reagovat na změnu průtoků
- netečnost vůči nestabilitám průtoků
- nízkou hmotnost, nízkou cenu, jednoduchou opravu
- konstrukční přesnost pro dodržení požadavků na sprej
- nízkou citlivost vůči poškození a korozi

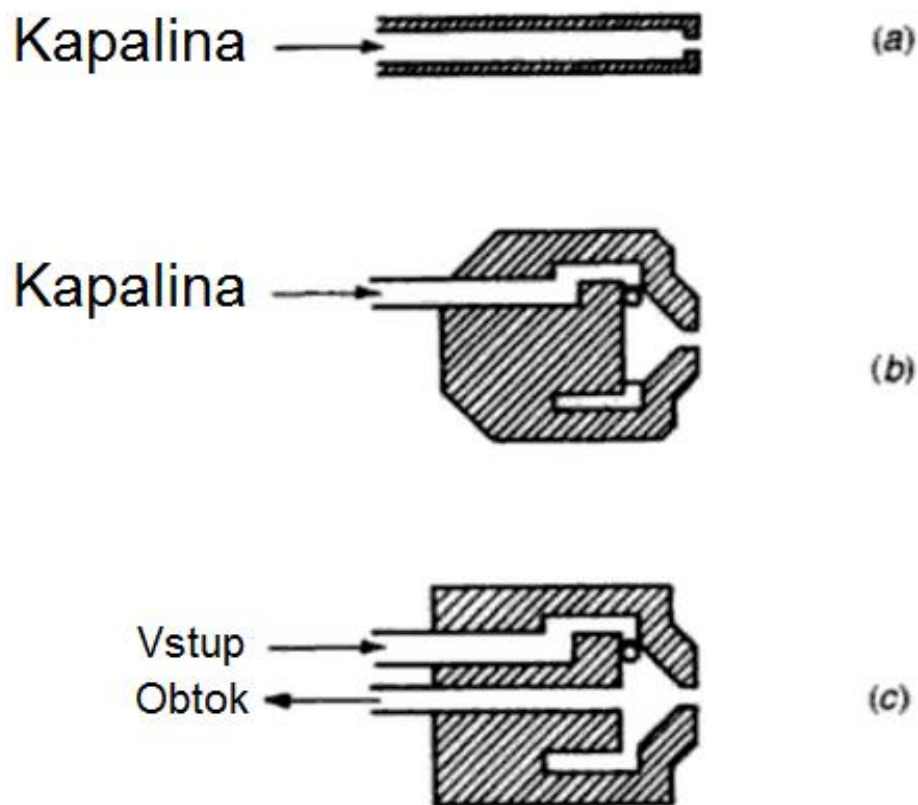
2 Klasifikace trysek

Tryska je zařízení, které přeměňuje proud kapaliny do malých kapek, a tvoří tak sprej. Bayvel a Orzechowski [8] rozdělili trysky podle typu energie použité k atomizaci jako například:

- tlak kapaliny
- tlak plynu
- mechanická energie
- elektrická energie
- vibrace

2.1 Tlakové trysky

Jedná se o nejběžnější typ atomizačních trysek, a ačkoli se nazývají tlakové, využívají k atomizaci energii mechanickou. Vzhled a funkce tlakové trysky se od dob představení v roce 1902 v podstatě nezměnily. Jde o velice levné a vysoce spolehlivé zařízení s jednoduchou konstrukcí.



Obr. 2.1: Schéma tlakových vířivých trysek: (a) Tryska s jednoduchým otvorem (Plain Orifice); (b) Jednoduchá tryska (Simplex); (c) Tryska s obtokem (Spill-Return), převzato z [3]

Tlakové trysky zahrnují několik konstrukčních typů, z nichž některé (Obr. 1.3) jsou popsány dále.

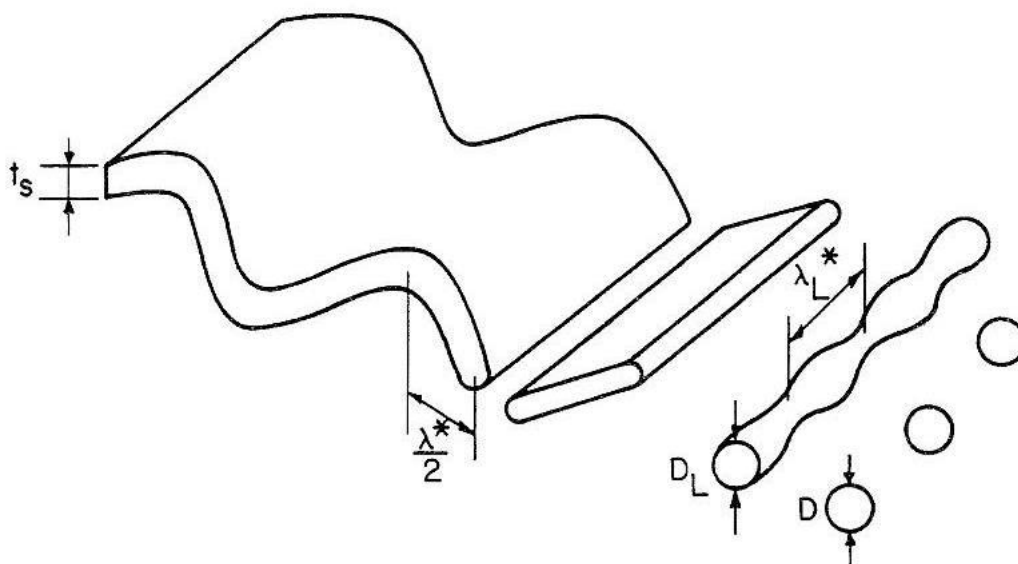
2.1.1 Tryska s jednoduchým otvorem (Plain Orifice)

Jde o nejjednodušší tlakovou trysku, kdy je kapalina tlačena skrze malý otvor. Za nízkého tlaku dochází pouze k výtoku kapaliny, ovšem při zvyšování tlaku se již tvoří dobrý sprej, jehož kvalita se s rostoucím tlakem zvyšuje. Nevýhodou trysky pro větší praktické použití je úzký kužel spreje [3].

2.1.2 Jednoduchá tryska (Simplex)

Jedná se o trysku, která díky širšímu kuželu spreje nabízí mnohem více aplikací. Před výstupním otvorem je navíc komora, v níž je pokles tlaku přeměněn na kinetickou energii potřebnou pro získání vysoké obvodové rychlosti. Kapalina se vlivem odstředivých sil drží po obvodu a při vysoké obvodové rychlosti kapaliny vzniká uprostřed komory vzdušné jádro.

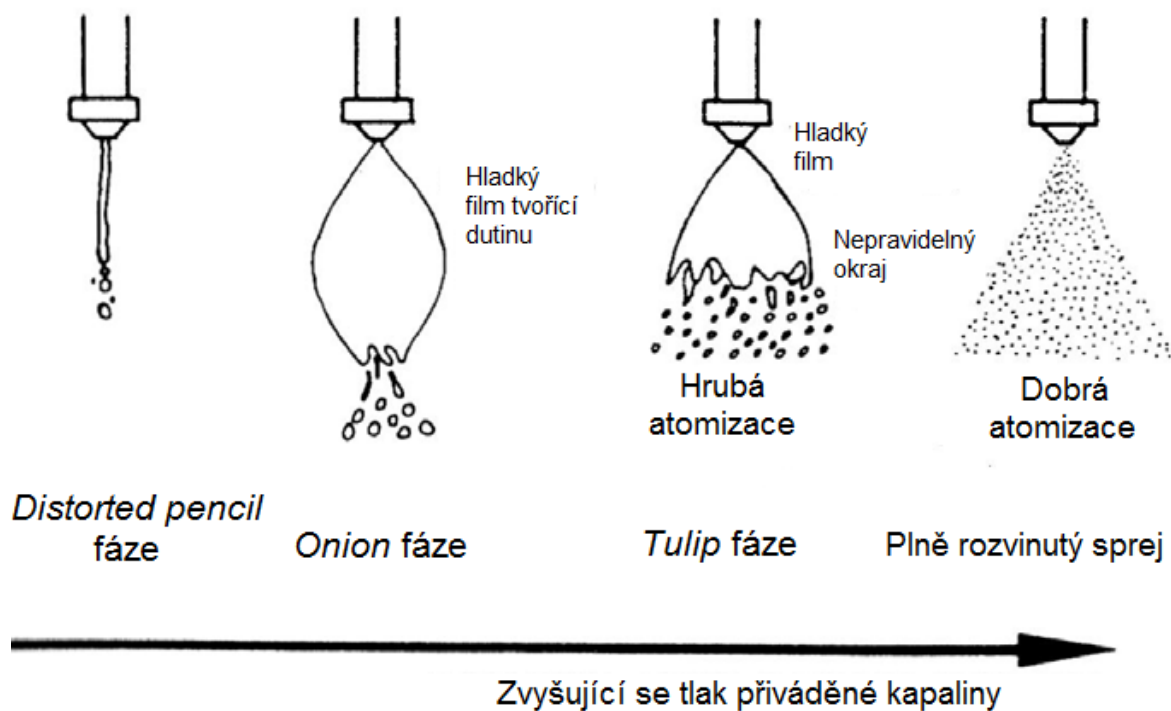
Z výstupního otvoru poté vytéká kapalina v podobě tenkého filmu, který si uchovává tangenciální i axiální složku rychlosti, která překoná vazebnou energii mezi atomy kapaliny, a tím způsobuje rozpad (viz 1.1 – primární a sekundární atomizace).



Obr. 2.2: Rozpad kapalinového filmu, převzato z [3]

Jak roste tlak z nulové hodnoty, prochází výsledný sprej několika fázemi (viz Obr. 1.4) [3]

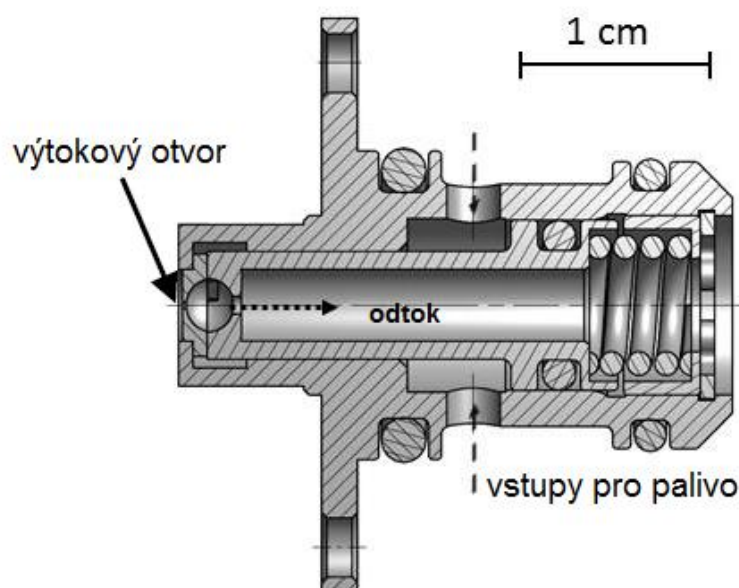
1. Kapalina vykapává z ústí trysky.
2. Dostává tvar úzkého proudu.
3. Začíná se formovat kužel, avšak povrchové napětí jej stále uzavírá do dutého tvaru, který připomíná tvar cibule.
4. Při vyšším tlaku sprej připomíná tvar tulipánu. Dochází k prvnímu rozpadu na poměrně velké kapky.
5. Kuželovitý tvar s dobrou atomizací.



Obr. 2.3: Formování spreje v závislosti na tlaku, převzato z [9]

2.1.3 Tryska s obtokem (Spill-return)

Tato tryska je téměř stejná jako *simplex*, navíc má na zadní stěně komory otvor pro odtok přebytečného množství kapaliny, které se tak vrací zpět do nádrže. Hlavní výhodou tohoto systému je vysoký vstupní tlak, a to i při velmi nízkých průtocích, Carey v [11] uvádí, že dostatečná atomizace proběhne i při 1 % maximálního průtoku. Mezi další výhody se řadí nepřítomnost pohyblivých částí, protože tryska je uzpůsobena tak, aby zvládala i vysoké průtoky a byla odolná vůči ucpání nečistotami.



Obr. 2.4: Řez tryskou s obtokem, převzato z [10]

Za nevýhodu lze považovat vysoké nároky na výkon čerpadla, které musí přečerpávat i recirkulační oběh nebo velké výchylky v úhlech kuželu spreje se změnou průtoku, což má negativní vliv na účinnost spalování. Dalším problémem tohoto systému je problematické měření průtoku [3].

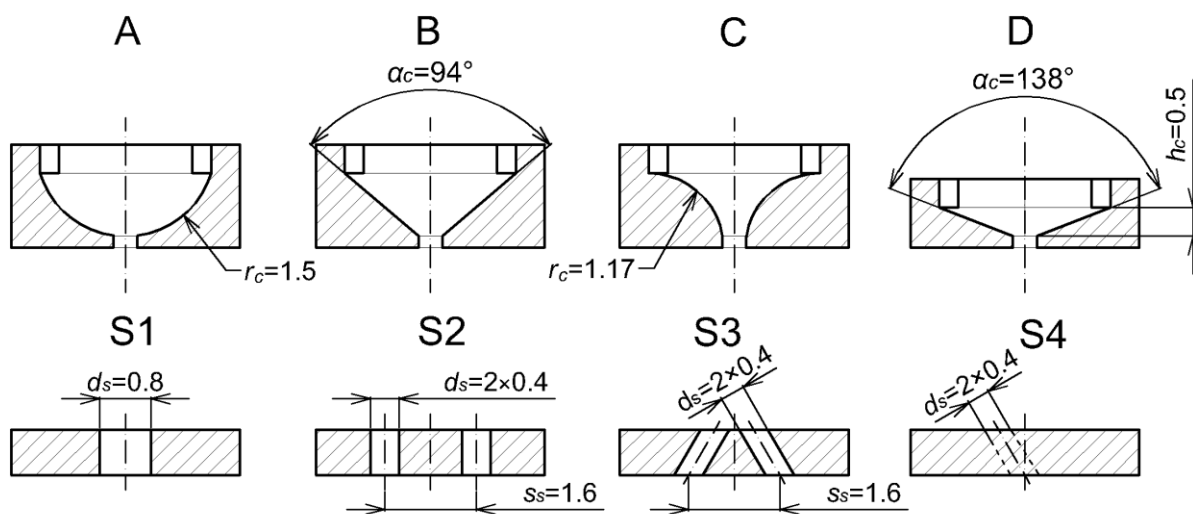
2.2 Konstrukce jednoduché trysky a trysky s obtokem

Základním prvkem konstrukce je komora, ve které při provozu víří kapalina. Komora a její geometrie (viz Obr. 2.5) se řadí k základním pilířům dalšího výzkumu. Vlivu geometrie na vnitřní proudění či sprej se věnovali například Cooper, Chinn a Yule [12] nebo Horway a Leuckel [13], kteří používali modulární trysku z plexiskla (viz 4.2, resp. 4.1).

Další nezbytnou částí vířivé trysky jsou tangenciální vstupy, kterými se kapalina dostává do komory. Většina trysek je opatřena dvěma vstupy proti sobě, avšak nejsou výjimkou vstupy tři, čtyři, nebo pouze jeden.

Konstrukci uzavírá zadní stěna, která může mít otvor, hovoříme o typu s obtokem, nebo otvor nemá a tryska je typu *simplex*. Tato práce se zabývá návrhem konstrukce především první zmiňované, ovšem způsob, jakým je navržena, umožňuje také sestavení trysky jednoduché.

Možnost změny geometrie a tvaru (viz Obr. 2.5) nabízí prostor jak ve výzkumu a vizualizaci vnitřního proudění, tak v měření výsledného spreje.



Obr. 2.5: Návrhy geometrie *spill-return* trysky; pro práci použito AS1

V práci je navrženo modulární řešení (možnost měnit pouze části trysky), lze tak například vyměnit typ odtokového otvoru nebo komoru, ale také měnit počet vstupů při zachování stejného sestavení trysky.

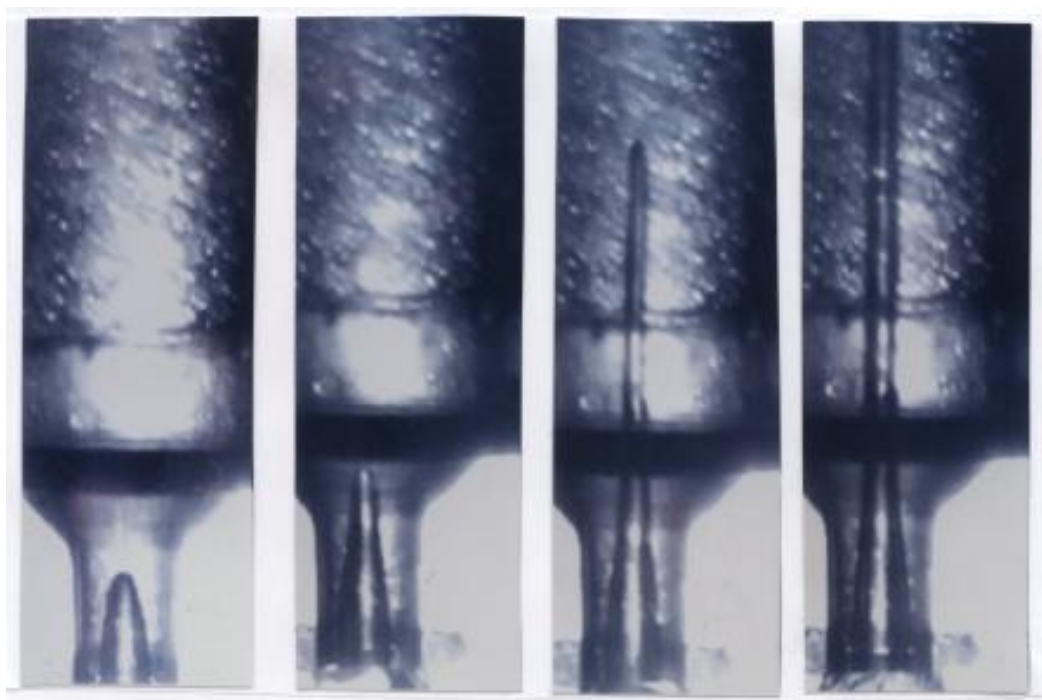
3 Vnitřní proudění

Ačkoli je problematika atomizace stará více než století, neexistuje žádná obsáhlejší teorie s popisem a vztahy, které by bylo možné aplikovat na řešení vnitřního proudění [14]. Obvykle je toto proudění zkoumáno pomocí optických metod aplikovanými na průhledné tlakové trysky. Nejpoužívanější metody jsou PDA a PIV. Kromě proudění samotného lze zkoumat například tvorbu vzdušeného jádra v trysce. K tomuto se většinou používá vysokorychlostní kamera s vysokou frekvencí snímků za sekundu.

Užívání těchto metod je neinvazivní, bezkontaktní. Použití mechanických sond či kontaktních snímačů by výsledné charakteristiky proudění zkreslilo [7].

3.1 Vysokorychlostní kamera

Základním zařízením používaným pro pozorování vnitřního proudění a tvorby vzdušného jádra je vysokorychlostní kamera s vysokým počtem snímků za sekundu. Tímto způsobem je možno zajistit vysoce kvalitní obrazovou dokumentaci s možností přehrání snímků se zpomalením přehrávání, lze se tak zaměřit na potřebné detaily.



Obr. 3.1: Formování vzduchového jádra, převzato z [15]

3.2 Fázová Dopplerovská anemometrie (PDA)

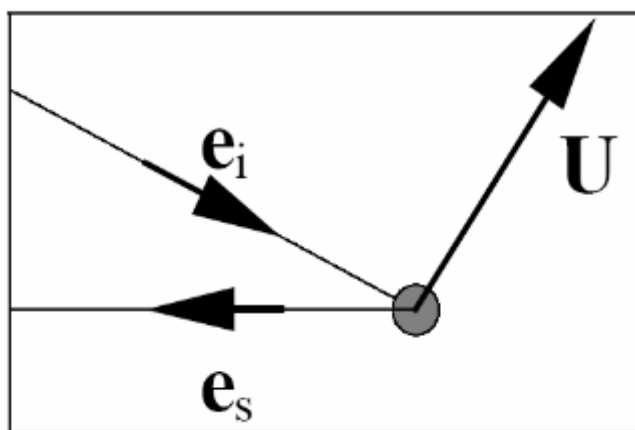
Metoda využívá monochromatické laserové světlo, jehož zdrojem je obvykle plynový laser. Například Horvay a Leuckel v [13] použili argonový laser se zeleným světlem o vlnové délce 514nm. Pro pochopení metody PDA je pro tuto práci dostačující osvětlení metody LDA. Důvodem je fakt, že PDA je pouze rozšířením metody LDA - Laserová Dopplerovská anemometrie, která je popsána níže.

3.2.1 Laserová Dopplerovská anemometrie (LDA)

Metoda LDA (označována také jako LDV - *Laser Doppler Velocimetry*) využívá Dopplerova efektu, kdy se díky částicím proudícího prostředí mění frekvence vyzařovaného paprsku a světlo je rozptylováno [16].

Dopplerův jev popisuje změnu frekvence a vlnové délky signálu mezi přijímačem a vysílačem (v praxi tento jev známe například změnou tónu sirény záchranné služby, jak se k nám přibližuje a oddaluje).

Níže (Obr. 3.2) je zobrazeno chování paprsku po kontaktu s částicí o rychlosti U . Směr paprsku je popsán vektory e_i respektivě e_s .



Obr. 3.2: Odraz paprsku od pohybující se částice, převzato z [18]

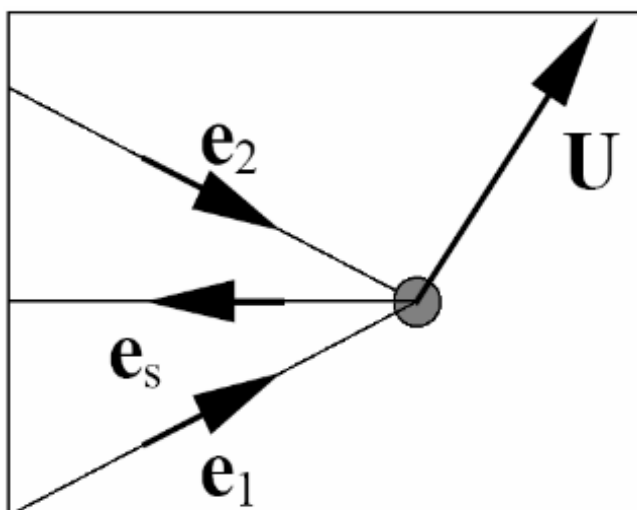
Frekvence světla, které dosáhne přijímače, může být spočítána následujícím vztahem:

$$f_s = f_i + f_i \frac{U \cdot (e_s - e_i)}{c} = f_i + \frac{U \cdot (e_s - e_i)}{\lambda_i} \quad 4.1$$

Kde f_s odpovídá frekvenci světla, dopadající na přijímač, f_i je frekvence světla před kontaktem s částicí, U je rychlost částice, c je rychlostí světla a λ_i je vlnová délka.

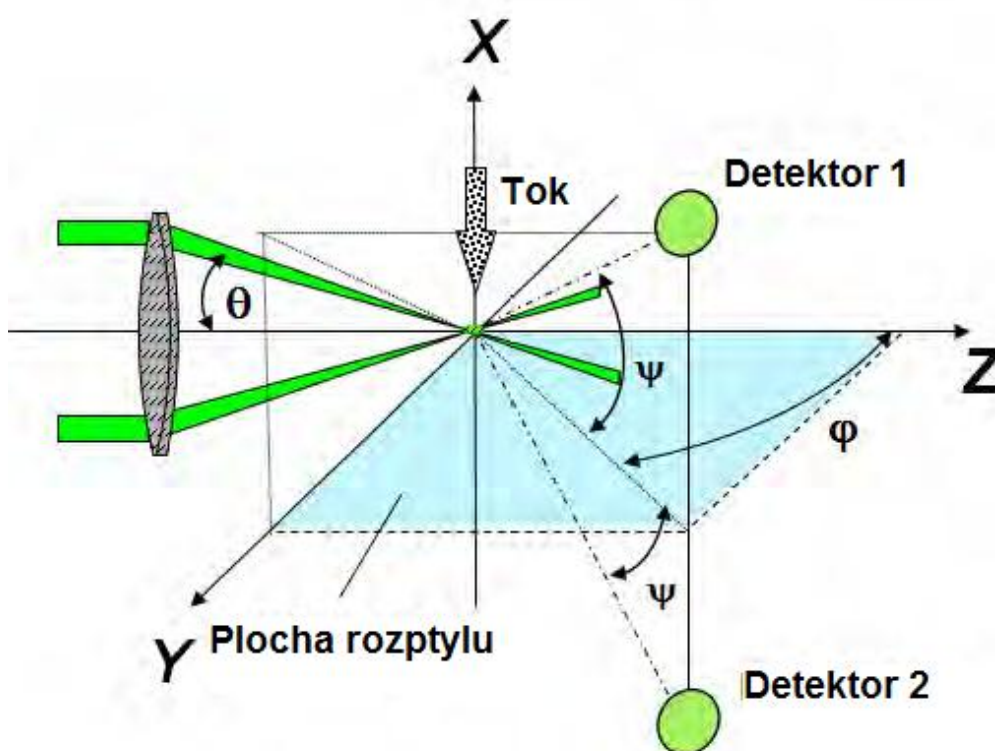
Druhý výraz reprezentuje Dopplerovu frekvenci, která je obvykle velmi malá (menší než frekvence světla) a pro jeden paprsek může být vyjádřena pouze pro vysoké rychlosti částice [7].

Běžný LDA systém však poskytuje osvětlení pomocí dvou paprsků z různých směrů (viz Obr. 3.3), které se scházejí do jednoho bodu, kde částice odráží oba paprsky.



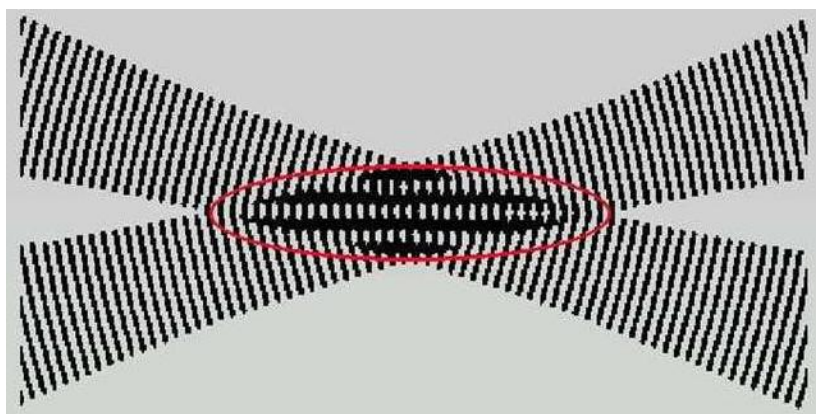
Obr. 3.3: Odraz obou paprsků od pohybující se částice, převzato z [18]

Pomocí polopropustného zrcadla dojde k rozdělení paprsku na dva o stejné intenzitě a ty se protnou v jednom bodě. Průsečík je pak místem měření a dochází v něm k jevu nazývaném jako interference¹⁷ světla [16].



Obr. 3.4: Princip LDA systému, převzato z [7, sekundární citace]

¹⁷ Interference (interferenční jev) znamená vzájemné ovlivňování, prolínání nebo střetání jevů či hmoty [17].



Obr. 3.5: Křížení laserových paprsků, převzato z [19]

Protože mají oba paprsky stejnou frekvenci, lze vypočítat Dopplerovskou frekvenci pomocí vztahu:

$$f_D = \frac{U \cdot (e_1 - e_2)}{\lambda_l} \quad 4.2$$

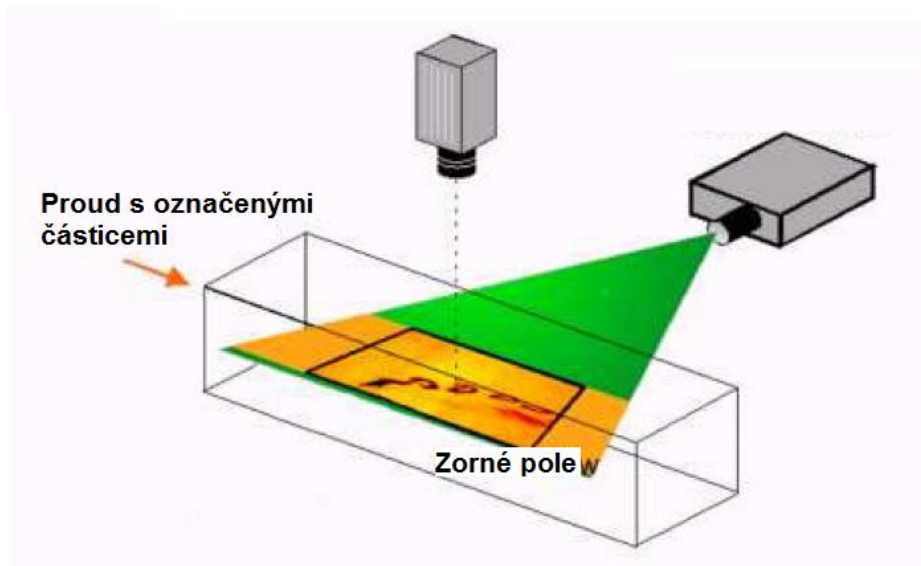
Kde f_D je Dopplerova frekvence, e_1 a e_2 směry paprsků a U je rychlost částice.

Metoda se v atomizaci používá pro měření rychlosti a směru částic – kapek.

3.3 Metoda PIV - Particle Image Velocity

Jedná se o modernější a pokročilejší metodu, než je LDA, která slouží k měření 2D nebo 3D proudění kapalin a plynů. Vizualizace proudění se provádí zavedením částic do tekutiny, za čímž následuje počítačové zpracování obrazu a získání vektorové mapy rychlostního pole.

Oproti PDA dokáže metoda PIV měřit rychlostní pole v rovině nebo dokonce v prostoru, avšak v porovnání s bodovými metodami (PDA, LDA, aj.) ztrácí s časem rozlišení i přesnost [16].



Obr. 3.5: Princip PIV systému, převzato z [16]

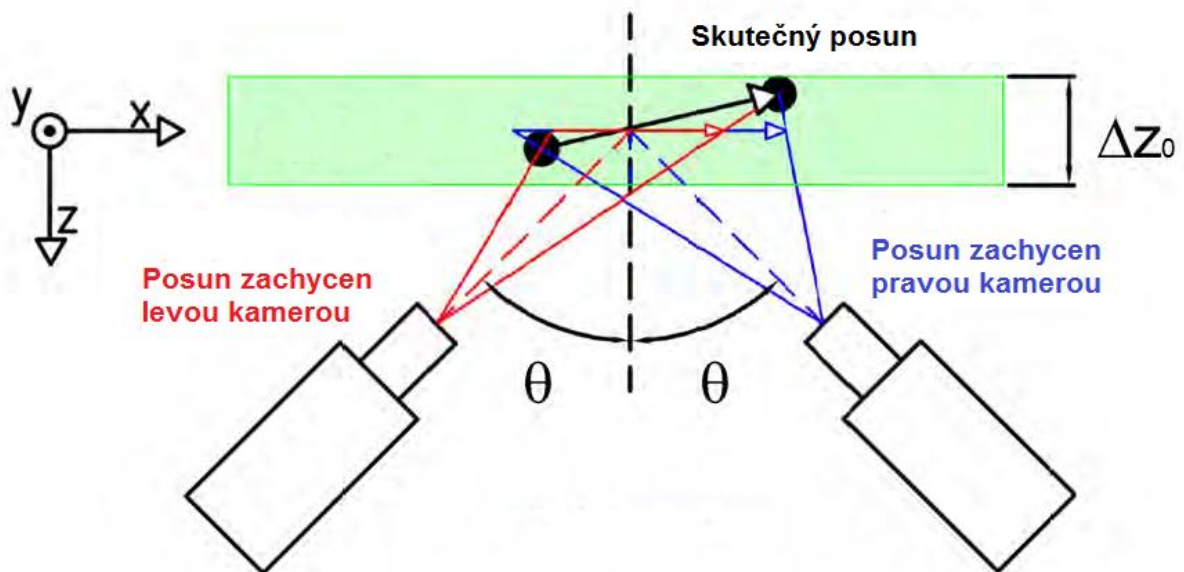
Metoda PIV je založena na zobrazování částic (Particle image), které jsou buď přidány do měřeného vzorku, nebo se v něm přirozeně objevují (aerosoly, kapky spreje a další). Přidávané částice musí být dostatečně velké pro zachycení světelným paprskem, ale také dostatečně malé, aby nenarušily tok samotný.

PIV aparatura bývá složena ze světelného zdroje, převážně laser, Osvětlené částice zachycuje digitální kamerou nebo fotoaparátem. Oba tyto přístroje jsou synchronizovány a připojeny k PIV počítači, který v reálném čase vykresluje rychlostní pole.

Měření metodou PIV s jednou kamerou (*Monoscopic PIV*) je ovšem zatíženo chybami. Tou první je ztráta informací ve směru kolmém na směr proudu (většinou označováno osou Z) (viz Obr. 3.6) a druhou chybou je ovlivnění jednotlivých složek rychlosti kvůli tomu, že kamera částice zobrazuje z perspektivy [20].

3.3.1 Stereoskopické PIV (SPIV)

Aby bylo možné odstranit tyto problémy, užívá se dvou kamer, které směřují do stejného bodu, ale každá má jinou pozici. Tato konfigurace umožňuje měřit přemístění v osách X a Y pro obě kamery a umožňuje tak dopočítat složku v ose Z.



Obr. 3.6: Stereoskopické PIV, převzato z [7]

4 Rešerše konstrukcí průhledných trysek

V současné době neexistuje program, který by po zadání parametrů a rozměrů trysky, vlastností kapaliny a tlaků dokázal vymodelovat chování kapaliny uvnitř trysky. Přestože se jedná o oblast ne zcela probádanou, prací, které se zabývají samotnou vizualizací vnitřního proudění nebo zobrazením tvorby vnitřního vzdušného jádra, je velmi málo.

Pro účely vizualizace a měření se používají průhledné modely trysek vyrobené z plexiskla (též PMMA, polymethylmetakrylát, akrylátové sklo, anglicky - *perspex*, *plexiglass*). Výhodou je možnost dosáhnout vysoké průhlednosti za přijatelných mechanických vlastností, které jej umožňují dobře obrábět do požadovaných rozměrů. Umožňuje použití optických metod zmíněných v kapitole 3. Plexisklu samotnému je věnována kapitola 5.

Kvůli vizualizaci a měření optickými metodami se používají modely zvětšené ve všech rozměrech (původní velikost průměru komory je například 3 mm). U takto zvětšených modelů je potřeba vyřešit několik problémů spojených jak se samotnou vizualizací, tak s kapalinou jako takovou.

Při zvětšení trysky musí být zachováno Reynoldsovo číslo a vírové číslo.

Reynoldsovo číslo, využívající rychlost kapaliny na vstupu a vzdáleností mezi konci trysky, lze popsat vztahem [15]:

$$Re = \frac{w_i \cdot 2R \cdot \rho_k}{\mu} \quad 4.1$$

Kde w_i je rychlost kapaliny vytékající z tangenciálních vstupů, R je vzdálenost mezi okrajem trysky a osou v jejím středu, ρ_k odpovídá hustotě kapaliny a μ je dynamická viskozita kapaliny.

Vírové číslo lze definovat jako poměr mezi momentem hybnosti toku a axiálním momentem toku a poloměrem jak komory tak výtakovým otvorem.

$$S_0 = \frac{Q \cdot \rho_k \cdot w_i \cdot R}{Q \cdot \rho_k \cdot u_0 \cdot r_0} \quad 4.2$$

Kdy stále platí, že w_i je rychlost kapaliny vytékající z tangenciálních vstupů, R je vzdálenost mezi okrajem trysky a osou v jejím středu a ρ_k odpovídá hustotě kapaliny, dále Q je velikost průtoku, r_0 poloměr výstupního otvoru a u_0 axiální rychlost.

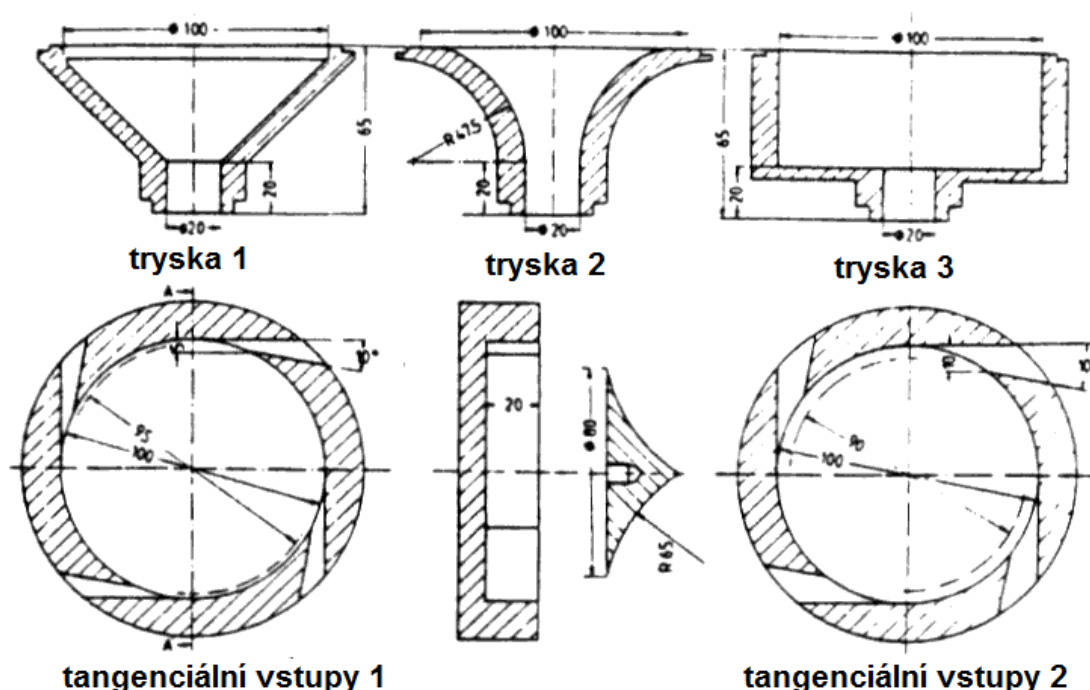
Z výrazů 4.1 a 4.2 je zřejmé, že pro docílení tohoto předpokladu je nutné se zvětšenou geometrií také změnit kapalinu. S tímto faktem ovšem nastává komplikace. Kvůli optickým metodám, které budou aplikovány, je zcela nezbytné, aby kapalina uvnitř trysky měla stejný index lomu jako plexisklo. Pokud by tato podmínka nebyla splněna, docházelo by ke zkreslení, či dokonce k neprohlédnutí celé trysky v důsledku odrazů a lomů světla.

Stejný problém měli i Horvay a Leuckel v [13, 22], kteří jej vyřešili smícháním tří kapalin – tetrahydronaftalenu, terpentýnu a ricinového oleje. Vzniklá kapalina měla stejný index lomu jako tryska.

Obecně lze říci, že prací, které by využívaly plexisklo v kombinaci s modulárním řešením je velmi málo, a není téměř žádná, která by se konstrukci samotné přímo věnovala.

4.1 Horvay a Leuckel (1984, 1986)

Právě jejich práci [13, 22] lze považovat za průkopnickou v oblasti konstrukce modulární průhledné trysky a zkoumání vnitřního proudění. Stala se velmi cenným zdrojem pro tuto práci, protože popisuje a nabízí řešení problémů, se kterými se autor potýká, případně může potýkat v budoucnu při použití jím navržené trysky. Ačkoli lze z jejich práce vyčíst mnoho podstatného pro konstrukci (jako jsou vnitřní rozměry a geometrie komory i vstupů), neobsahuje podrobnější výkresovou dokumentaci celého systému.



Obr. 4.1: Geometrie trysek, které Horvay a Leuckel zkoumali, převzato z [13]

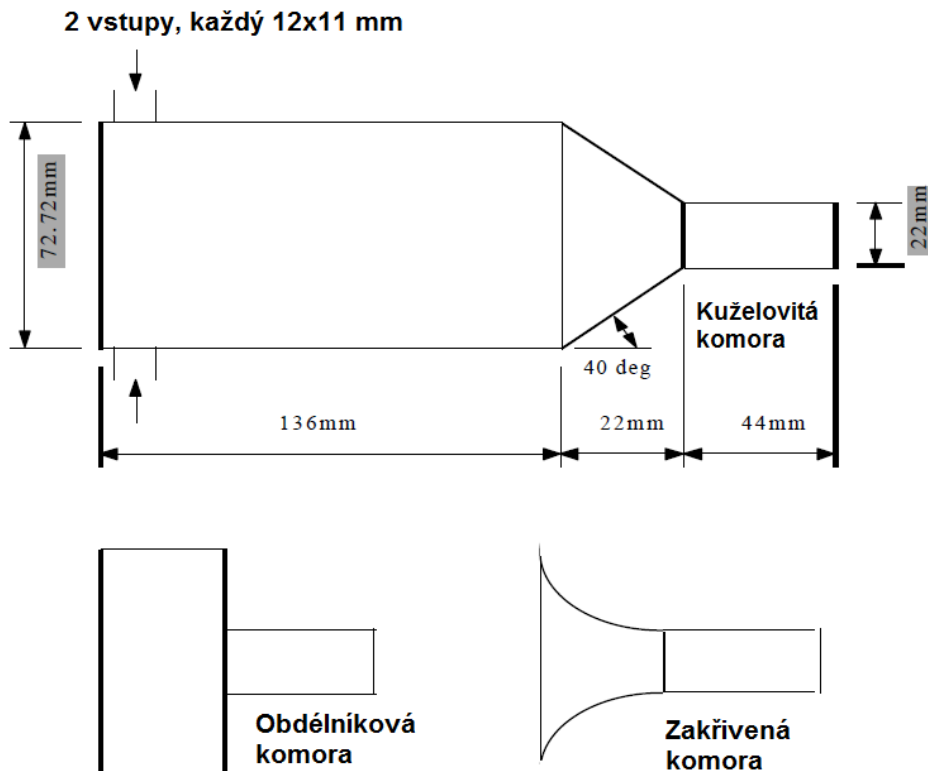
V práci byla použita tryska s obdélníkovým, kuželovitým a konkávním (zakřiveným) průřezem. Dále byly použity dva typy tangenciálních vstupů s obdélníkovým průřezem s rozdílnou šířkou. Celá tryska pak byla uzavřena v kovové skříni, která měla ve stěnách skleněné tabule. Toto uložení dovoľovalo zeslabení stěn, což zlepšovalo průchodnost světla a snižovalo jeho odraz.

Pracovní kapalina byla namíchána z tetrahydronaftalenu, terpentýnu a ricinového oleje, jejichž poměrem lze ovlivňovat viskozitu, a tím i Reynoldsovo číslo. Jejich výzkum byl zaměřen především na metodu LDA a získ rychlostního profilu v jednotlivých geometriích trysek.

Nevýhodou celého systému byla přítomnost dalšího optického rozhraní – skleněná stěna v kovovém boxu a celková složitost systému. Kvůli konstantní velikosti kovové skříně nebylo možné měnit výšku dílů.

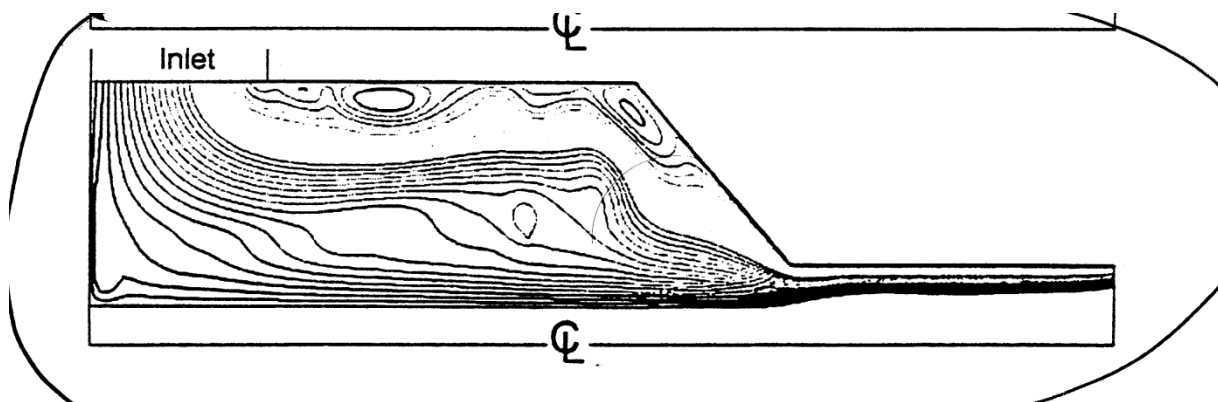
4.2 Cooper, Chinn a Yule (1999)

V práci [12] je použita průhledná tryska s pevným tělem a tangenciálními vstupy. Mění se pouze geometrie komor, a to opět s kuželovitým, obdélníkovým a konkávním (zakřiveným) průřezem. Práce je zaměřena především na vykreslení rychlostního pole a popis samotné konstrukce je velice stručný, lze ji však využít jako ukázkou budoucího použití trysky z této statě.



Obr. 4.2: Geometrie trysek z práce Cooper, Chinn a Yule, převzato z [12]

Hlavní náplní bylo měření a vytvoření rychlostního pole skrze celou trysku s použitím LDA metody. Vyhodnocení předcházelo odstranění šumu, který byl způsoben rozkladem světla skrze stěny trysky rozhraním mezi vzdušným jádrem a kapalinou. Po vyhodnocení byl vytvořen obraz rychlostního pole, kde lze najít víry u stěny trysky a u vzdušného jádra. Vlny těchto vírů se projevily na vzdušném jádru.

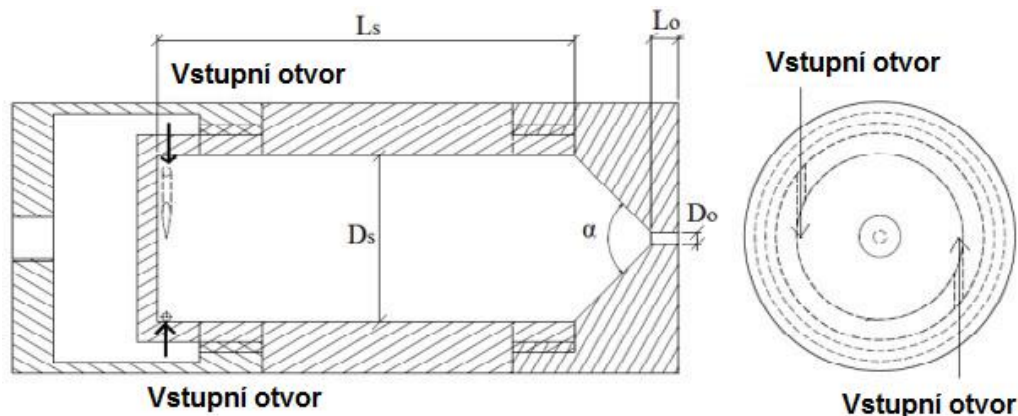


Obr. 4.3: Rychlostní pole s víry, převzato z [12]

Tato práce nebyla z hlediska konstrukce příliš přínosná, a to zejména kvůli naprosté absenci popisu sestavy nebo sestavení, avšak ukazuje měřicí metody, které budou aplikovány. I u této práce lze předpokládat podrobněji popsanou sestavu, která je zahrnuta v [24].

4.3 Rashid, Hamid, Sheng a Ghaffar (2012)

V jejich práci je konstrukce trysky řešena pomocí závitů, což umožňuje snadné smontování a rozmontování sestavy a závity jsou poměrně dobře těsnící. Avšak toto řešení má mnoho nevýhod, které odrazují od jejich použití v autorově práci. V publikaci je také popsána testovací sestava.



Obr. 4.4: Celá sestava trysky, převzato z [23]

Přestože se závity mohou jevit jako dobré konstrukční řešení, jejich aplikace by znamenala značné omezení z hlediska vizualizace. Jsou neprůhledné až téměř neprůsvitné, takže by skrz ně nebylo do trysky vidět, jak je patrné z obr. 4.5. V řešení autorovy práce by se nacházely na místech důležitých pro vizualizaci - odtokový otvor nebo tangenciální vstupy.



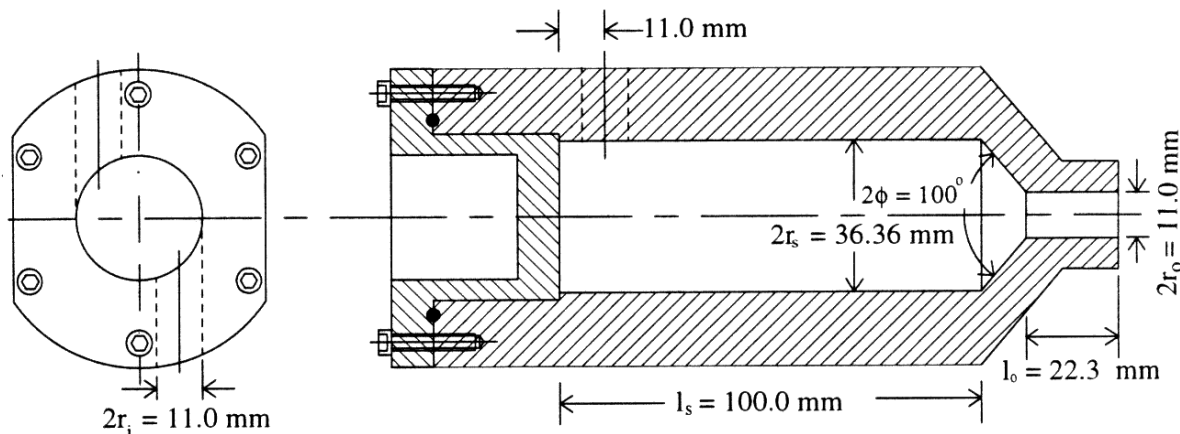
Obr. 4.5: Závité spojení dílů, převzato z [23]

Další nevýhodou pro závity je sám materiál, ačkoli je možnost vyrobit plexisklo s dobrými mechanickými vlastnostmi, stále hrozí poškození závitů při montáži i demontáži. Část poničená tímto způsobem je v podstatě bezcenná bez možnosti sestavení.

Tryska je v této práci využívána pro měření úhlu kužele spreje v závislosti na geometrii komory. Použito bylo několik nástavců s různými úhly kužele komory, které byly jednoduše namontovány na tělo trysky. Poté byla nafocena obrazová dokumentace zachycující jak sprej a jeho úhel, tak vnitřní geometrii. Pro tyto účely je závit dobrým konstrukčním řešením

4.4 H. J. K. De Keukelaere (1995)

Autor v práci používá zvětšený model trysky z plexiskla, na který aplikuje měřicí metody pro zjištění průtoku a tlaku, zkoumá rychlostní pole a měří průměr vzdušného jádra. Pro tato měření je model vytvořen z celistvého kusu plexiskla opatřeného pouze víkem a těsněním

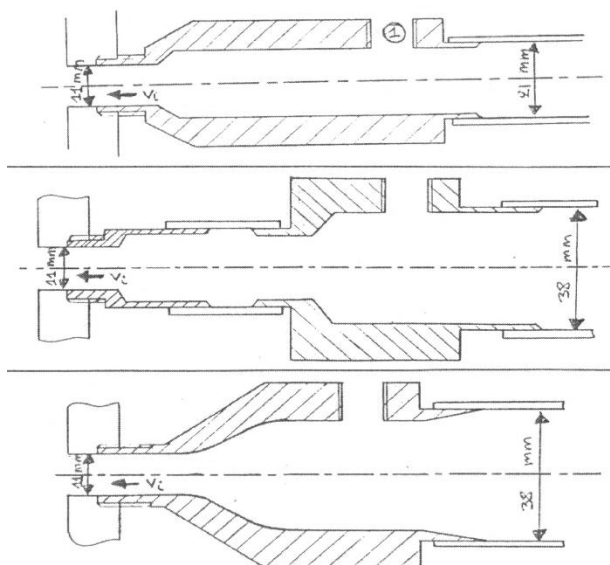


Obr. 4.6: Model trysky, převzato z [14]

Na pohledu shora (viz obr. 4.6) jsou viditelné rovnoběžné rovinné stěny. Řešení umožňuje paprskům světla měřících přístrojů procházet bez odrazů nebo lomů. Těto skutečnosti bylo využito i při autorově návrhu.

Dalším přínosem je detailní popis včetně schémat testovací sestavy. Zanesena jsou všechna měřicí čidla, optické přístroje s bližším vysvětlením celé metody. Tryska má také zakótovanou téměř celou geometrii a práci lze použít pro znovu vyrobení modelu. Tímto umožňuje celou práci zopakovat, ověřit hodnoty a navázat ve výzkumu.

Nevýhoda konstrukce tkví v nemožnosti ji segmentovat, v práci samotné je užito tří modelů, každý vyroben s rozdílnou geometrií. Poskytuje však cenné informace jak o konstrukci, tak o měřících metodách.

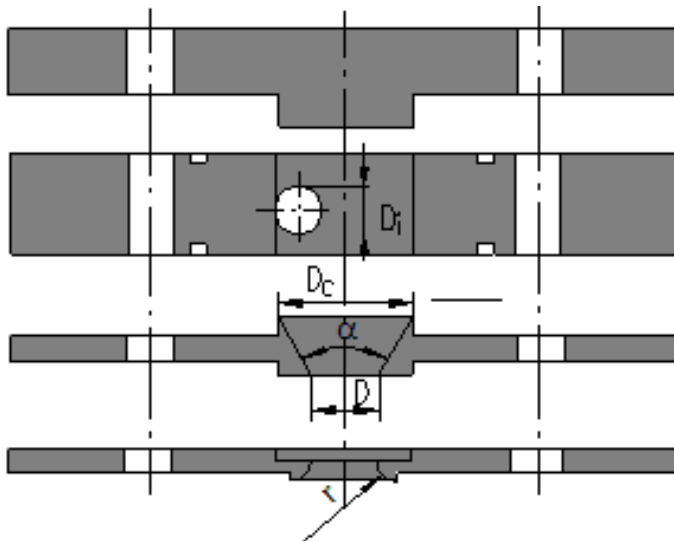


Obr. 4.7: Modely trysek, převzato z [14]

4.5 Feggeler, Landwehr a Walzel (2006)

V této práci se autoři zaměřili na použití PIV metody k měření a zkoumání rychlostního pole spreje. Pro tyto účely není potřeba tryska průhledná, avšak její přínos pro tuto práci náleží především konstrukčnímu řešení.

Tryska je složena ze 4 dílů – výtokový otvor, komora, tangenciální vstupy a víko (to může být v konfiguraci *simplex* nebo *spill-return*, viz 2.2). Ty jsou sešroubovány pomocí šroubů vedených dírami skrz ně.



Obr. 4.8: Konstrukce modulární trysky, převzato z [25]

Z obr. 4.8 je patrný průchod šroubů jednotlivými díly. Toto řešení bylo použito i pro autorovu práci, především díky vysoké míře modularity a absenci jiných součástí pro zajištění spojení.

Nevýhodou jsou vysoké nároky na přesnost jednotlivých dílů a jejich pozice mezi sebou. Další problém je fakt, že pro zkoumání vnitřního proudění nebo měření vzdušného jádra nelze použít plexisklo s osazením, jako je u dílů (viz obr. 4.8) patrné. Ačkoli by při velice přesné výrobě částečně pomáhalo s těsností proti unikající kapalině, znehodnocovalo by světelný paprsek. Na rozhraní by docházelo k odrazu části světelného paprsku zpět do kamer, což by snižovalo kvalitu naměřených hodnot i obrazové dokumentace.

Doléhání hran by také nebylo zcela dokonalé a v těchto místech by světelný paprsek prostupoval z prostředí do prostředí, což by způsobovalo lom (viz *Fermatův princip* – kap. 1.2.3) na obou rozhraních, a opět by docházelo ke snížení kvality měření.

5 Plexisklo (PMMA)

Jedná se o termoplastický, přirozeně bezbarvý, chemicky odolný materiál na bázi polymethylmetakrylátu (PMMA), který může být dále zpracováván - barvení, povrchové úpravy, tvarování apod. Následující informace jsou shrnutím [26]. Výroba PMMA se dělí na dva typy:

5.1 Extrudované PMMA

Výroba tohoto plexiskla probíhá v extrudovací lince, kdy je granulát PMMA zahřát a protlačen mezi válci. Proces je náchylný na výkyvy a čistotu okolí. Extrudovaný pás se obvykle rovná a následně řeže do většinou do obdélníkových tabulí.

Toto plexisklo vyniká snadnou vyrobiteľností a jednoduchou strukturou, kdy jsou řetězce polymeru PMMA uspořádány ve směru extruze. Lze jej obrábět běžnými metodami, avšak pro tyto činnosti není příliš vhodný. Používá se především ve formě desek a tabulí. Pro složitější tvary se používá druhý typ.

5.2 Lité PMMA

Díky složité a nepravidelné makrostruktuře je lité plexisklo mnohem odolnější materiálem vůči obrábění, a lze tak dosahovat vyšších přesností rozměrů a lepších drsností. Vyrábí se odléváním mezi skleněné desky, které jsou utěsněny pružnou lištou. Po odlévání následuje polymerace v peci a vznik finální struktury.

5.3 Porovnání litého a extrudovaného PMMA

Lité plexisklo lépe odolává vůči mechanickému poškození, jako je praskání nebo lámání. Díky lepší teplotní stabilitě jej lze přesněji obrábět, s čímž také souvisí lepší výsledná optická propustnost. Nevýhodou litého PMMA jsou větší úchyly v tloušťce materiálu, což se řeší klasickým obráběním.

6 Vlastní návrh trysky a výsledky práce

Aplikací poznatků a faktů z předchozích kapitol, které popisovaly atomizaci, vlastnosti provozních kapalin, princip optických metod, jež budou v kombinaci s tryskou použity a publikovaná konstrukční řešení, s konzultací vedoucího práce, bylo dosaženo konečného návrhu tlakové vířivé trysky.

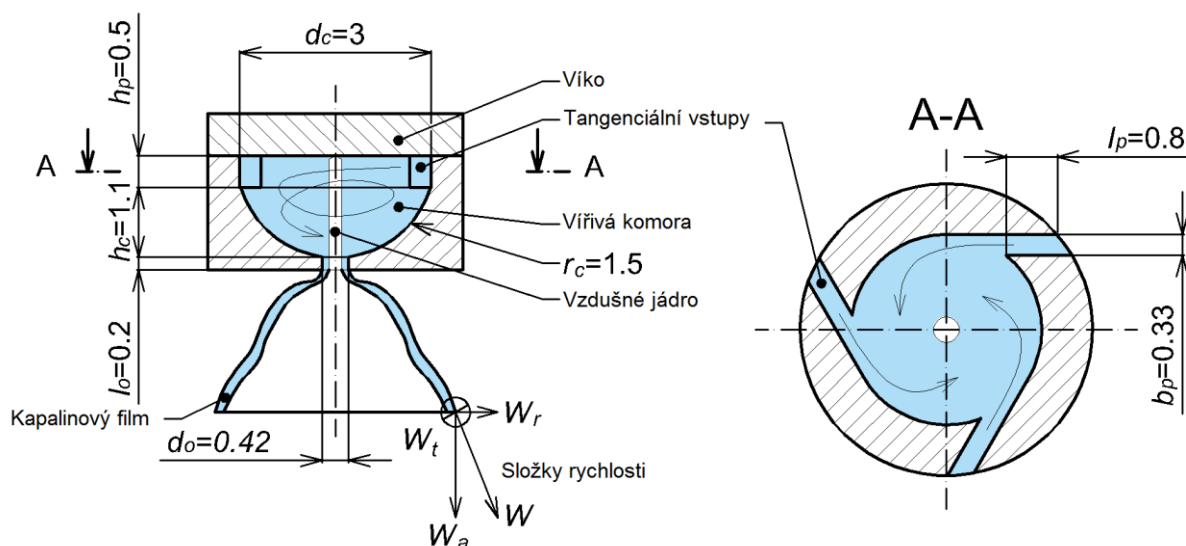
Tryska se skládá z 3 částí, a to z komory s výtokovým otvorem, dílu s tangenciálními vstupy a dílem s částí pro obtok. Jedná se tak konfiguraci *spill-return*, výměna posledního dílu umožňuje konfigurovat trysku *simplex*. Vyměnitelný je každý díl této trysky, lze tak vyměnit například komoru se specifickou geometrií za jinou, při zachování počtu i tvaru tangenciálních vstupů a odtokového otvoru, nebo pouze zvýšit počet vstupů atd.

Bylo upuštěno od konstrukce se 4 díly (viz 4.5), kdy byly komora a výtokový otvor rozděleny na dva díly. Důvodem byla příliš tenká deska s otvorem, slabé stěny komory na rozhraní těchto dvou částí a vysoké nároky na přesnost výroby.

Předpokládá se konstrukce z litého plexiskla, které bude obráběno, broušeno, lapováno a leštěno do zrcadlového lesku. Těmito operacemi, které budou aplikovány na všechny vnější stěny, komoru, tangenciální vstupy i odtokový otvor, dojde ke značnému snížení drsnosti a úpravě geometrie a dojde k téměř dokonalému průhlednění.

6.1 Prvotní návrhy

Pro tuto práci byla vybrána konfigurace AS1 (viz obr. 2.5), a to kvůli základním rozměrům geometrie, které vedoucí této práce dodal. Od tohoto návrhu se budou v budoucnu odvíjet další modifikace.

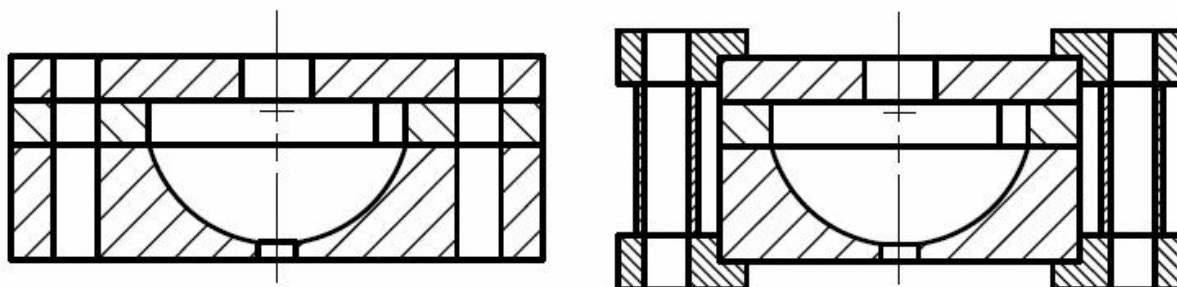


Obr. 6.1: Základní rozměry trysky

Pro spojení dílů bylo navrženo několik řešení – především pomocí šroubových spojení. Závitové spojení, které můžeme pro modulárnost uvažovat, má mnoho nevýhod, které by byly neslučitelné se správným fungováním trysky jako celku. Především by to byla obrovská náročnost na přesnost výroby závitů, které časem podlehlý drobnému poškození a prořezání skrz pevnou strukturu. Díly by po sešroubování nelícovaly vnějšími stěnami, což by

v podstatě znemožnilo tento koncept použít pro optické metody, nehledě na fakt, že skrz zá-
vity by tyto metody nebylo možno použít.

Šroubové spojení se tedy jeví jako jediná použitelná metoda pro spojení dílů trysky. Toho lze
docílit dvěma způsoby, a to šrouby vedenými skrz trysku, nebo mimo ni.



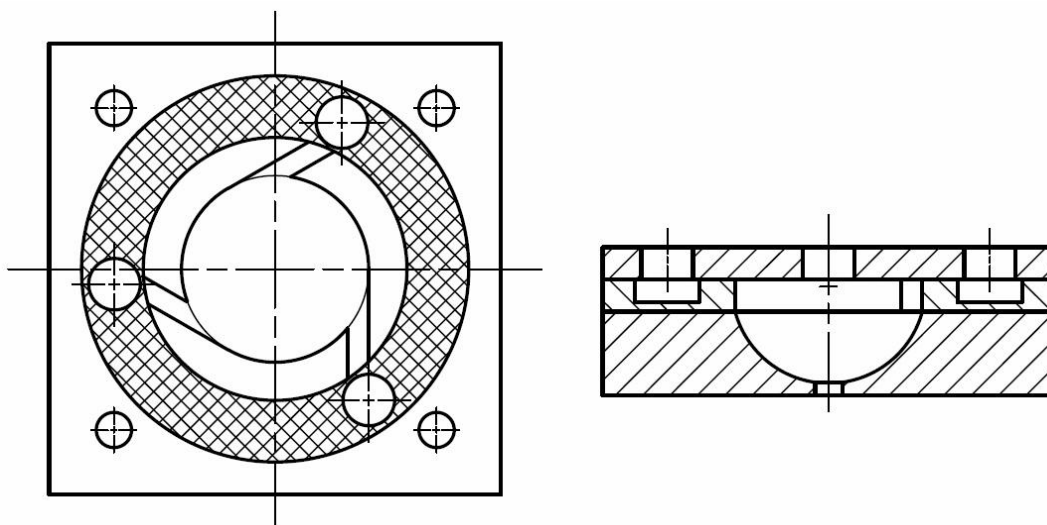
Obr. 6.2: Návrhy trysek se šrouby uvnitř trysky a mimo ni

Z obr. 6.2 je patrná konstrukce obou prvotních návrhů. U první je voleno provrtání děr
skrz všechny části a jejich sešroubování s podložkami opírající se o díly trysky. Druhý návrh
by byla klec, která by se opírala především o rohy trysky. Mezi částmi „klece“ by byly trubky,
které by zlepšovaly sešroubování, při zabránění ohybu dílců klece.

Zvolena byla první konstrukce, tedy sešroubování skrz profil. Důvodem byla jednodušší
konstrukce a její kompaktnost. Řešení také nabízí snadnější modulování, a to i v případě kdy
by došlo k velkým změnám výšky trysky, například prodloužením dílu s tangenciálními
vstupy, jako je tomu v práci [14] (viz 4.3). Z bočního pohledu je nutné, aby otvory pro šrouby
byly vedeny mimo komoru nebo tangenciální vstupy, a nebránily tak použití optických metod.

6.2 Rozpracování návrhu

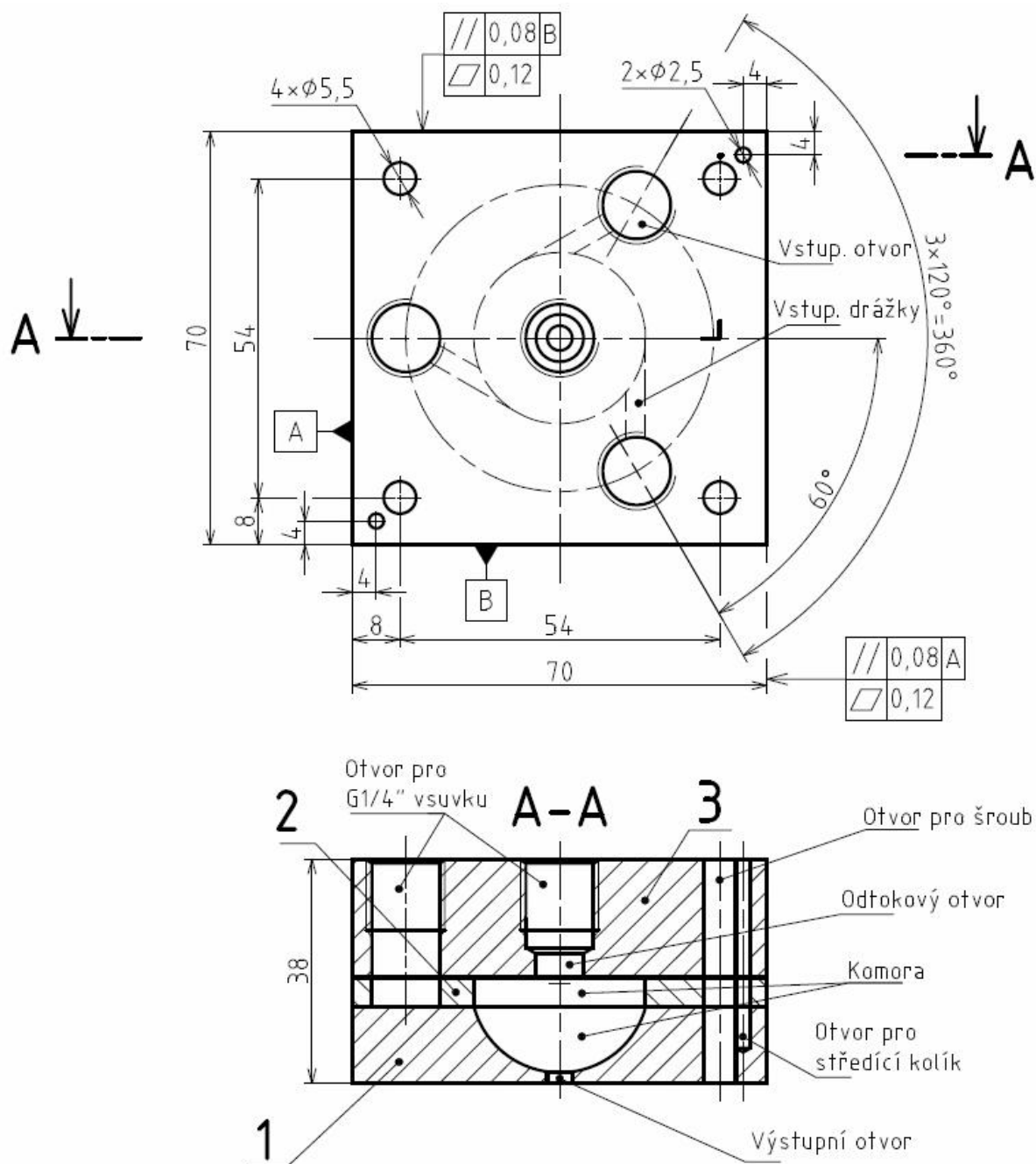
Po zvolení základní konstrukce byla potřeba vyřešit otázku přívodu kapaliny a napojení
obtokového okruhu. Prvotní myšlenka byla vyfrézování drážky v dílu se vstupy. V té by vedly
hadice do jednotlivých vstupů, nebo by byla kapalinou zaplněna. Ovšem to by neumožňovalo
užití optických metod, profil by byl navíc velmi oslaben a také by mezi drážkou a vstupy byla
ostrá hrana.



Obr. 6.3: Návrh trysky s drážkou (vyšrafovaná oblast)

Proto byla zvolena konstrukce s provrtanými dírami skrz oba díly. Toto řešení se jeví jako nejlepší z pohledu jak optických metod, tak jednoduchosti konstrukce a modularity. Konstrukce převzala rovinné stěny z práce [14] (viz kap. 4.4) pro lepší aplikování optických metod.

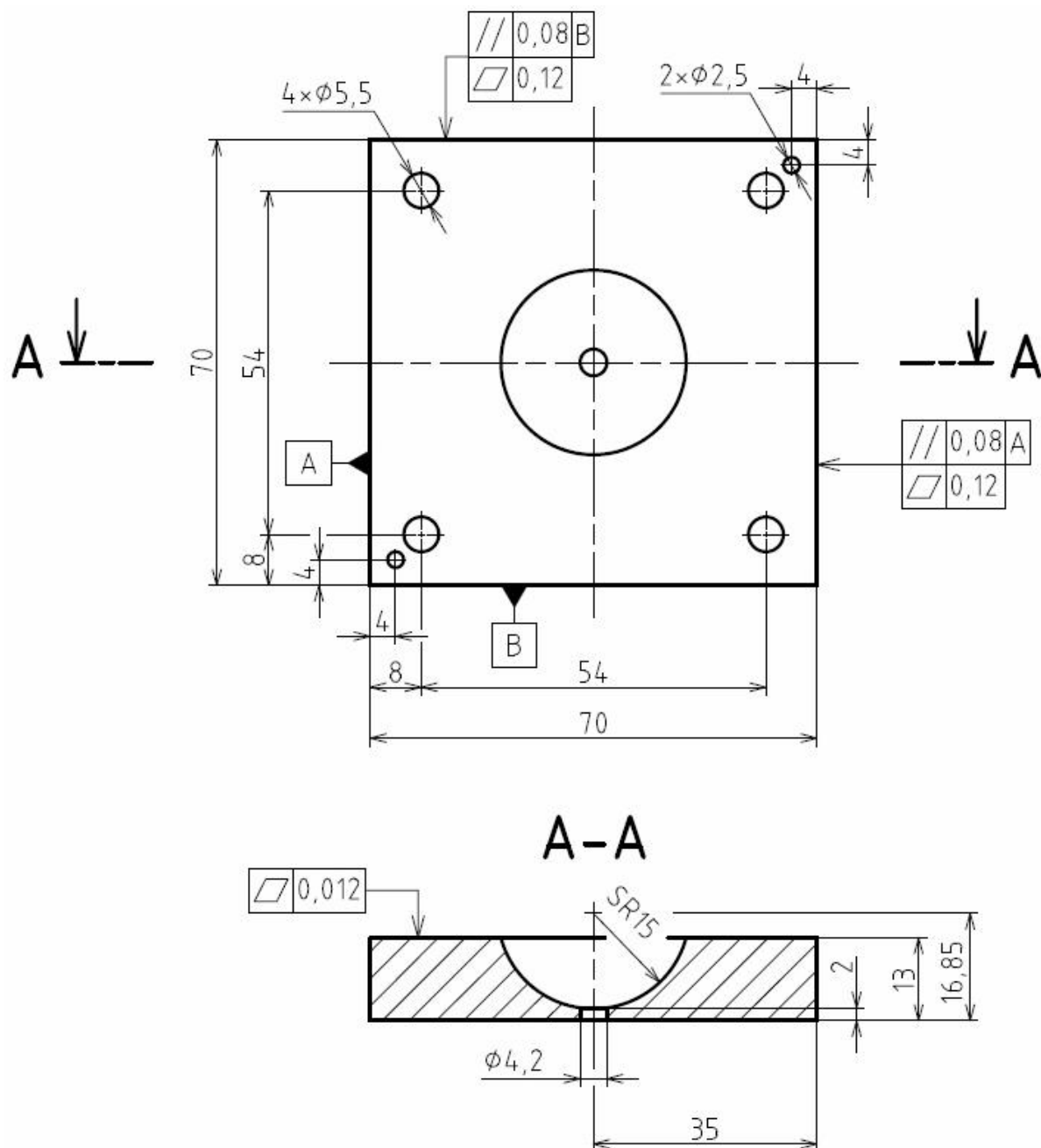
Dále byly zakomponovány otvory o průměru 2,5mm pro středící kolíky. Otvory pro přívod kapaliny do tangenciálních vstupů a otvor pro obtok jsou vyvrtány, a poté je v nich vyřezán závit G1/4“. Do těchto děr jsou zašroubovány mosazné nebo nerezové vsuvky G1/4“-G1/4“, případně redukované vsuvky s jedním závitem G1/4“ a druhým koncem podle potřeby. Toto řešení bylo zvoleno z důvodu šetrnosti k závitům v trysce. Vsuvky se zašroubují do trysky pouze jednou a hadice přivádějící nebo odvádějící kapalinu budou našroubovány na vsuvky. Pokud by se spoj projevil jako netěsný, budou vsuvky do závitů zalepeny pomocí dvousložkového polyuretanového lepidla, nebo bude vlepena vsuvka s trnem.



Obr. 6.4: Sestava všech dílů: 1) díl s komorou, 2) díl se vstupy, 3) díl s otvory pro přívod a odvod kapaliny; celá sestava včetně tolerancí a úchylek je v příloze 1

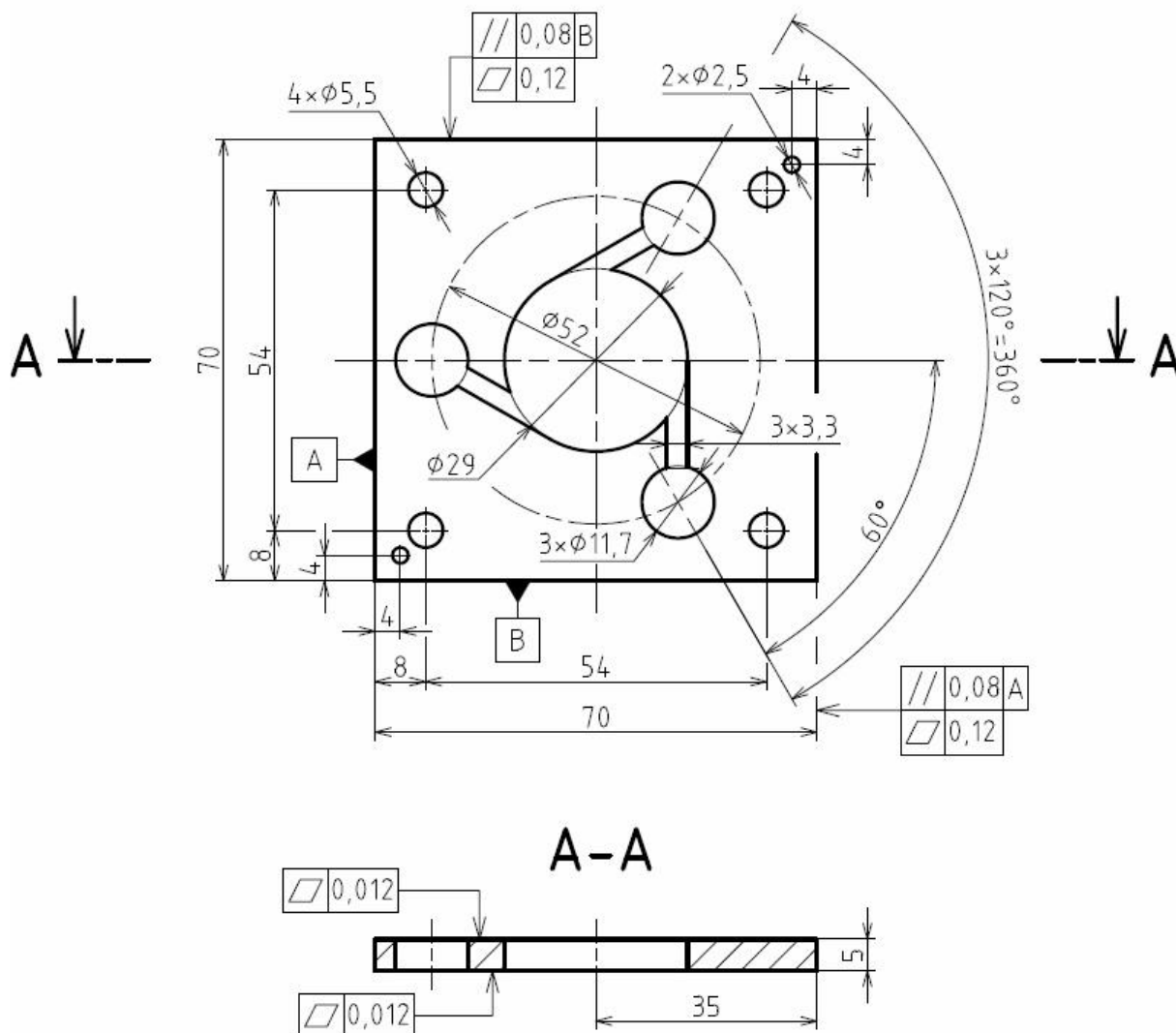
Všem stěnám trysky je předepsána rovinnost stěny samotné a rovnoběžnost se stěnou protější. Tento předpis slouží pro zajištění co nejlepších podmínek pro aplikaci optických metod. Celou trysku lze sešroubovat pomocí M5 šroubů s podložkou. V tomto případě bude děrami protažena tyč s M5 závitem a budou na ni našroubovány matice, tím bude zajištěno spojení i při nárůstu výšky trysky.

Všechny díly jsou středěny a srovnány pomocí středících kolíků, které je doporučeno použít už při obrábění hlavních rozměrů, aby byla zaručena maximální možná přesnost a lícování dílů.



Obr. 6.5: Díl s komorou

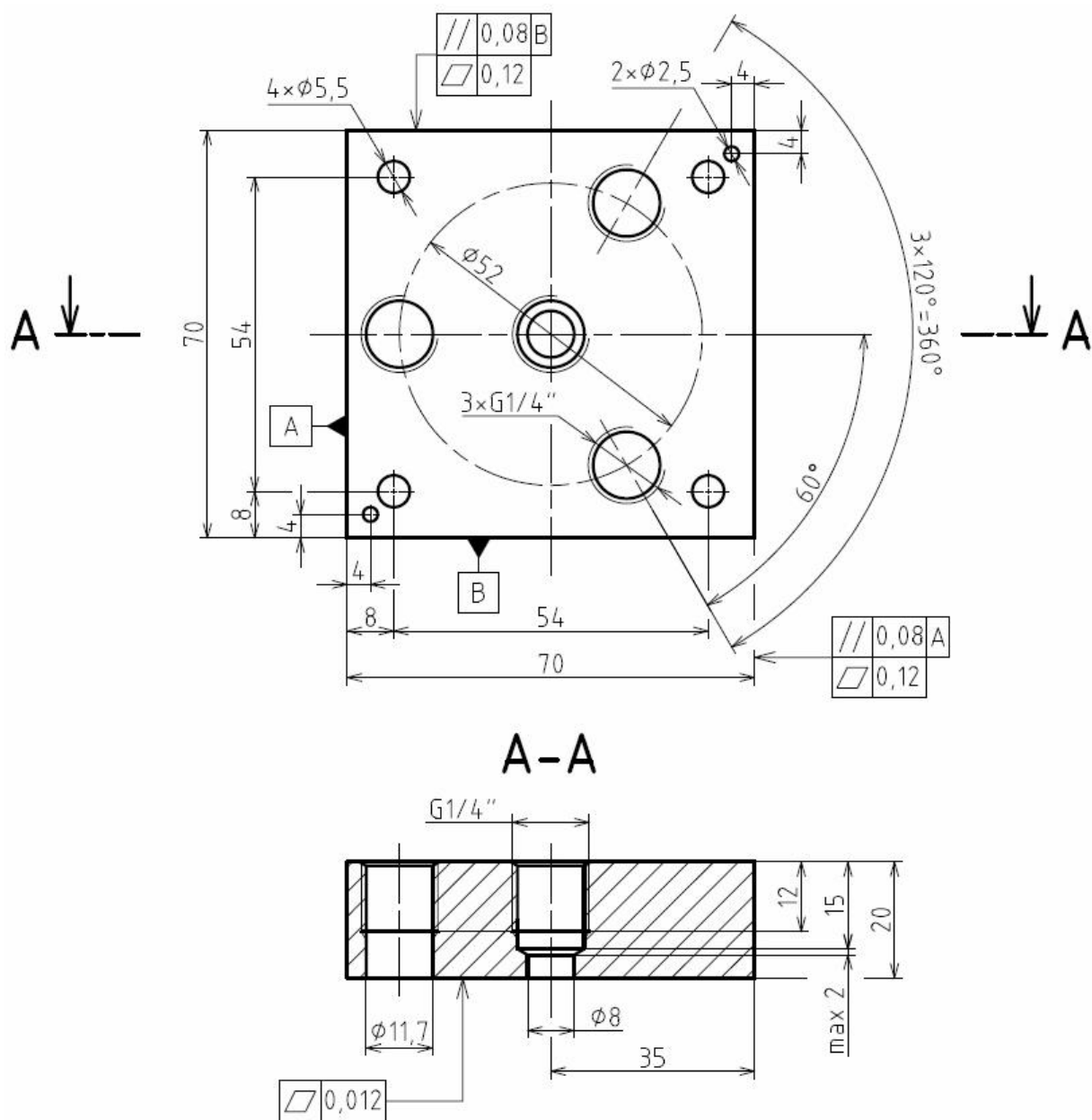
Dále je předepsána přísná tolerance na dosedací plochy všech dílů. Předpokládá se, že geometricky rovný povrch dílů v kombinaci se silou způsobenou jejich sešroubováním bude dostatečně těsnit. Při úniku kapaliny mezi díly by docházelo k znehodnocování optických měření, a pokud by vytékala až na stěny, na trysce by byla nerovnoměrná vrstva kapaliny a její průhlednost by klesala.



Obr. 6.6: Díl se třemi tangenciálními vstupy

Pro přesnost dílů je doporučeno skolíkovat horní a střední díl (díl s otvorem pro obtok a tangenciální vstupy, též vstupní drážky – viz obr. 6.4) a vrtat díry o průměru 11,7 mm v obou dílech, čímž je dosaženo přesného lícování děr, poté řezat závit pro vsuvky.

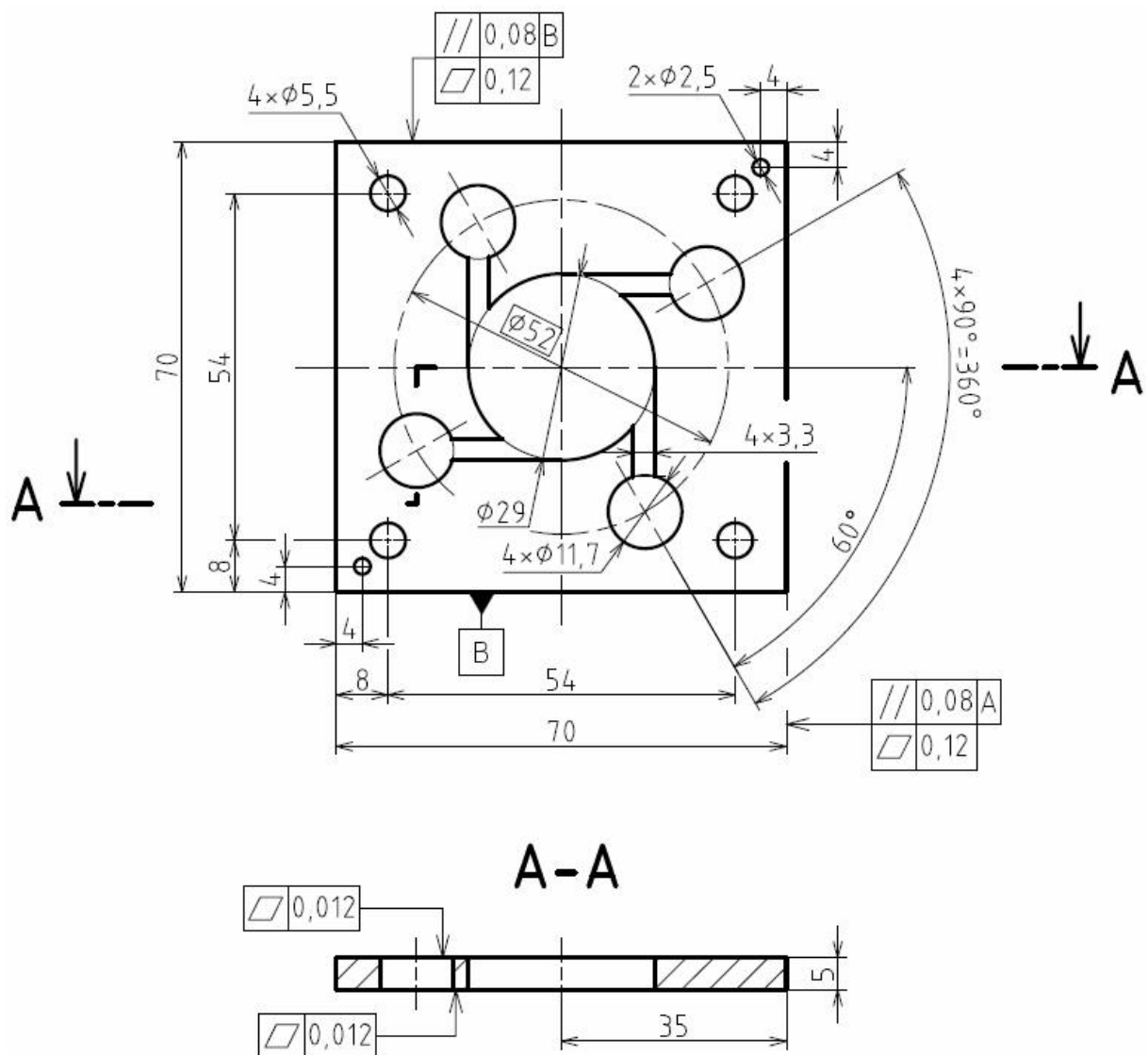
Tangenciální vstupy procházejí skrz celý prostřední díl, díky tomu mohou být vyřezány laserem. Pokud ne, je doporučen dotek nástroje v komoře a následné frézování směrem z komory ke vstupnímu otvoru.



Obr. 6.7: Díl s otvory pro přívod a odvod kapaliny

Pokud tryska nebude těsnit po utažení šroubů a další dotahování by způsobilo poškození celistvosti, nabízí se dvě možná řešení problému. Prvním je přidání kovových desek, které jsou s tryskou sešroubovány jako vnější díly a dochází k rovnoměrnějšímu tlaku na trysku. Deska přiléhající na komoru musí být uzpůsobena tak, aby nezakrývala ústí trysky. Druhá deska má vyvrtány průchozí otvory pro vsuvky. Platí, že oba přídavné kusy kovu musí být také upraveny podle potřeb celé sestavy. Přidání kovové konstrukce bude řešeno až po výrobě trysky a její montáži do testovací sestavy. Zvažován je také kovový rám po obvodu horního a spodního dílu.

Druhým řešením spojení všech dílů se nabízí lepení dílů. Kvůli lité struktuře plexiskla se používá dvousložkové lepidlo obsahující polymery PMMA. Ovšem tryska tak ztratí možnost díly měnit, protože budou pevně slepeny.



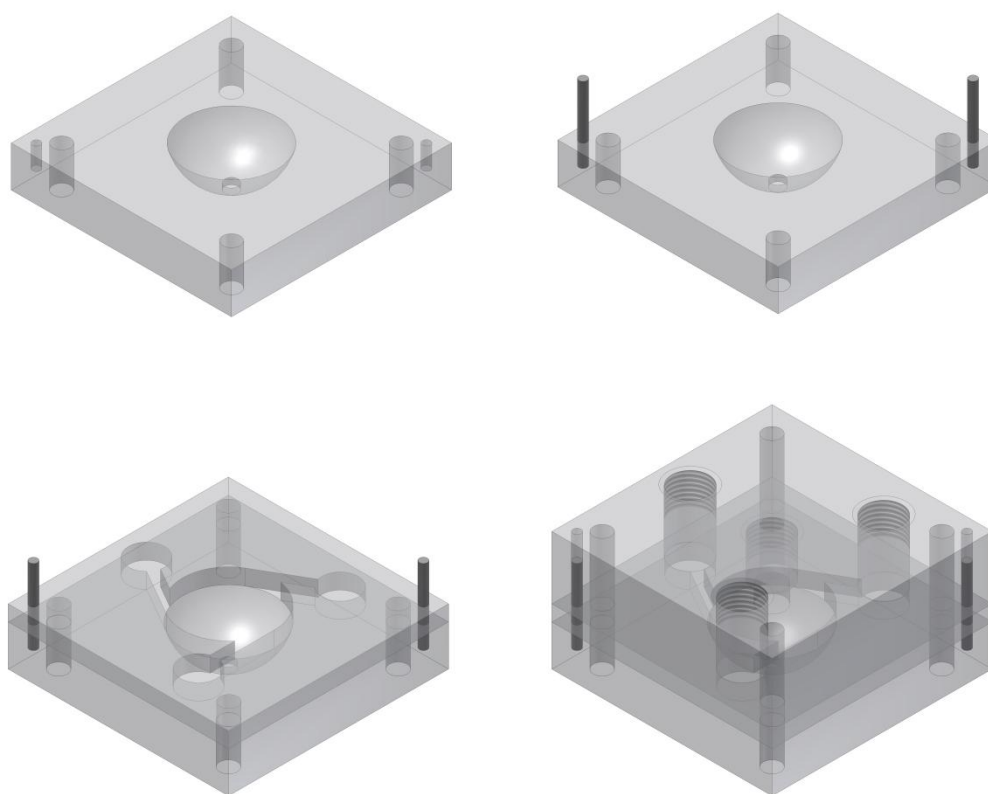
Obr. 6.8: Díl se čtyřmi tangenciálními vstupy

Na obr. 6.8 je patrná takřka totožná geometrie jako u dílu se vstupy třemi (viz obr. 6.6). Poloha otvorů pro šrouby, středících kolíků, velikost tangenciálních vstupů i velikost komory byly zachovány. Změnily se tak pouze počet a poloha vstupů. Z tohoto důvodu může být zachována geometrie komory, ovšem musí být vyměněn vrchní díl s otvory přivádějícími kapalinu, který jich obsahuje správný počet.

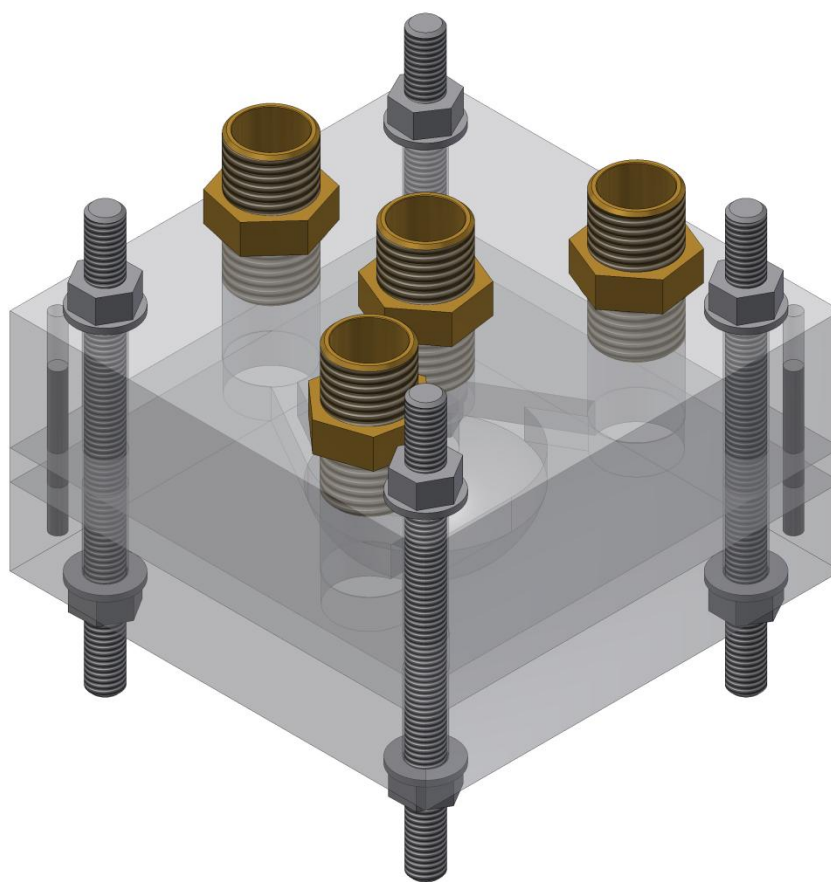
6.3 3D model trysky

Před výrobou trysky z plexiskla byl vytvořen a vytisknut ABS (Akrylonitrilbutadienstyren). Tento model byl podroben testu v sestavě a použit pro prezentační účely. Přesnost 3D tisku je 0,2 mm a nelze jím natisknout funkční závity. Z tohoto důvodu byly z modelů pro tisk odstraněny a byl vytisknut pouze „předvrtaný otvor“. Funkčnost trysky je značně omezena, zejména kvůli vlastnostem materiálu ABS, netěsností mezi díly a značné drsnosti vytisknutého modelu. K nepřesnosti se také může přidat nepřesnost nebo nedokonalá výroba.

Přesto tryska z ABS umožňuje hrubou atomizaci kapaliny – tvar spreje je mezi fázemi *tulip* a *onion*.



Obr. 6.9: Postupné složení trysky; do dílu s komorou jsou zalisovány středící kolíky a postupně přidávány jednotlivé díly



Obr. 6.10: Celkové sešroubování trysky

K sešroubovanému modelu (viz obr. 6.10) se připojí hadice a tryska se usadí do celé sestavy. Vsuvky lze použít mosazné nebo nerezové. Doporučená jakost pro závitové tyče, použité pro sevření dílů, je minimálně 8.8.

Autorem navržená tryska bude podrobena testům funkčnosti. Pokud by se konstrukce z určitých důvodů ukázala jako nevyhovující, bude pozměněna. Tryska například nemusí být dokonale vodotěsná, pak je na zvážení zda nezvolit jiný koncept trysky. Dalším potencionálním problémem je praskání nebo poškozování dílů v okolí závitů, v tomto případě je doporučováno upustit od závitů a mosazné vsuvky do děr vlepit (viz kap. 6.2).

7 Závěr

Cílem této práce byl návrh a konstrukce modulární průhledné trysky, příprava výkresové dokumentace a 3D modelu. Dalšími úkoly bylo nastudovat základní principy atomizace, optické metody používané pro její měření a vyhledání prací, které by popisovaly tvorbu průhledné trysky.

Tryska se v konečné podobě bude skládat ze tří dílů vyrobených z plexiskla. Tyto díly bude možné nahrazovat jinými s odlišnou geometrií. Naskýtá se tak možnost testovat vliv velkého množství parametrů samotné trysky na finální podobu spreje nebo proudění kapaliny uvnitř. Pokud se autorem navržený model ukáže jako vyhovující, budou jím vypracovány další díly (viz obr. 2.5), jejichž vliv na kapalinu bude zkoumán pomocí optických metod (viz kap. 3).

K testovaným parametrům bude patřit také tlak. Ten bude měřen membránovými tlakovými sondami. Jejich zavedení do trysky bude předmětem další autorovy práce s modelem. Jako nejpravděpodobnější řešení se jeví vyvrtání děr o malém průměru (2 mm) ve spodním dílu směrem do komory. Poloha otvorů nebude bránit použití optických metod, ale může ovlivňovat rychlostní pole kapaliny.

O skutečně modulární řešení tohoto typu v kombinaci s průhledností trysky se takřka nikdo nepokusil. Nejblíže tomuto modelu je práce z roku 1984, kdy byly jednotlivé díly uzavřeny v kovovém boxu se skleněnými boky. Snaha odstranit další optické prostředí v kombinaci s poznatky autorů, kteří pracovali s průhledným modelem trysky a spolu s konzultací vedoucího této práce, vedla autora ke konečné podobě trysky.

Obsah této práce představuje základ pro pochopení dějů, které nastávají při rozprašování kapaliny včetně popisu optických metod použitých pro jejich měření a zkoumání. Jejím dalším využitím je detailní popis tvorby modelu, díky čemuž mohou na práci snadno navázat další lidé, kteří se problematikou budou zabývat.

Kroky a rozhodnutí, které autor učinil při návrhu, jsou v práci odůvodněny a popsány. Popsány jsou také konstrukční prvky, které byly převzaty z jiných prací, včetně vysvětlení, proč jsou použity právě zde.

Využití poznatků získaných ze studia spreje a vnitřního proudění může pomoci při optimalizaci tvaru i rozměru atomizačních trysek k dosažení lepšího rozprášení kapaliny. V praxi toto zlepšení může zvýšit účinnost motorů díky lepšímu smíchání paliva se vzduchem nebo rovnoměrnějšímu nastříkání nátěru a může mít mnoho dalších využití.

Seznam použitých zdrojů

- [2] LIU, H. *Science and Engineering of Droplets: Fundamentals and Applications*. Noyes Publications/William Andrew Pub., 2000. 534 p. ISBN 0-8155-1436-0.
- [3] LEFEBVRE, A. – BALLAL, D. R. *Gas Turbine Combustion*. CRC Press, 3rd edition, 2010. 560p. ISBN 978-1-4200-8605-8.
- [4] MALÝ, M. *Kvalita rozprašování paliv u malých tlakových vířivých trysek*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2014. 52 s. Vedoucí bakalářské práce doc. Ing. Jan Jedelský, Ph.D.
- [5] ŠOB, F. *Hydromechanika*. Brno: Akademické nakladatelství CERM s.r.o., 2002. ISBN 80-214-2037-5.
- [6] Zmeškal, O. *Geometrická optika*. In: *Základy obrazového inženýrství* [online]. March 12, 2004 [vid. 2016-2-13]. Dostupné z http://www.fch.vut.cz/~zmeskal/obring/prednasky_2005/02_geometricka_optika.pdf
- [7] ĎURDINA, L. *Measurement of Spray Characteristics Using Optical Measurement Methods*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2012. 81 s. Vedoucí diplomové práce Ing. Jan Jedelský, Ph.D.
- [8] BAYVEL, L. – ORZECOWSKI, Z. *Liquid Atomization*. Taylor&Francis, 1993. 462 p. ISBN 0-89116-959-8
- [9] LEFEBVRE, A. H. *Atomization and Sprays*. Combustion: An International Series. Hemisphere Publishing, 1989. 434 p. ISBN 978-0891166030
- [10] DURDINA, L. – JEDELSKÝ, J. – JICHA, M. *Experimental Investigation on Spray CharacteristicS of Pressure-Swirl Atomizers for a Small-Sized Jet Engine*. International Journal of Heat and Mass Transfer [online]. ISSN 0017-9310.
- [11] CAREY, F. H. *The Development of the Spill Flow Burner and Its Control Systém for Gas Turbine Engines*. Journal of the Royal Aeronautical Society, 1954.
- [12] COOPER, D. – CHINN, J. J. – YULE, A. J. *Experimental Measurements and Computational Predictions of the Internal Flow Field in a Pressure Swirl Atomizer*. 15th Institutute for Liquid Atomization and Spray Systems, 1999
- [13] HORVAY, M. – LEUCKEL, W. *LDA-Measurements of Liquid Swirl Flow in Converging Swirl Chambers with Tangential Inlets*. Laser Anemometry in Fluid Mechanics, p. 487-503, 1984
- [14] DE KEUKELAERE, *The Internal Flow in a Swirl Atomizer Nozzle*, MSc Dissertation, Dept. Mech. Eng., UMIST, 1995.
- [15] CHINN, J. J. *The Internal Flow Physics of Swirl Atomizer Nozzles*. UMIST, Thermo-Fluids Division, Department of Mechanical Engineering

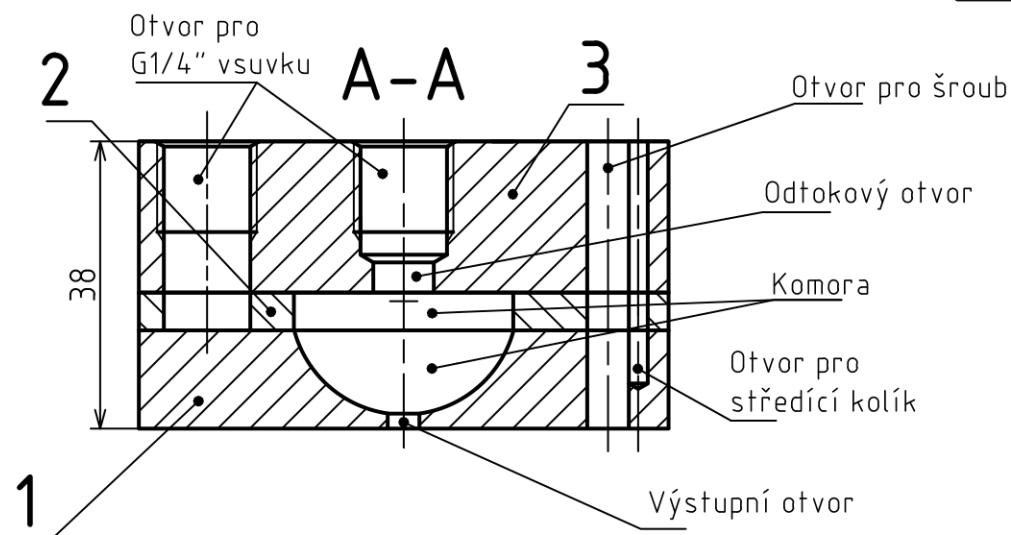
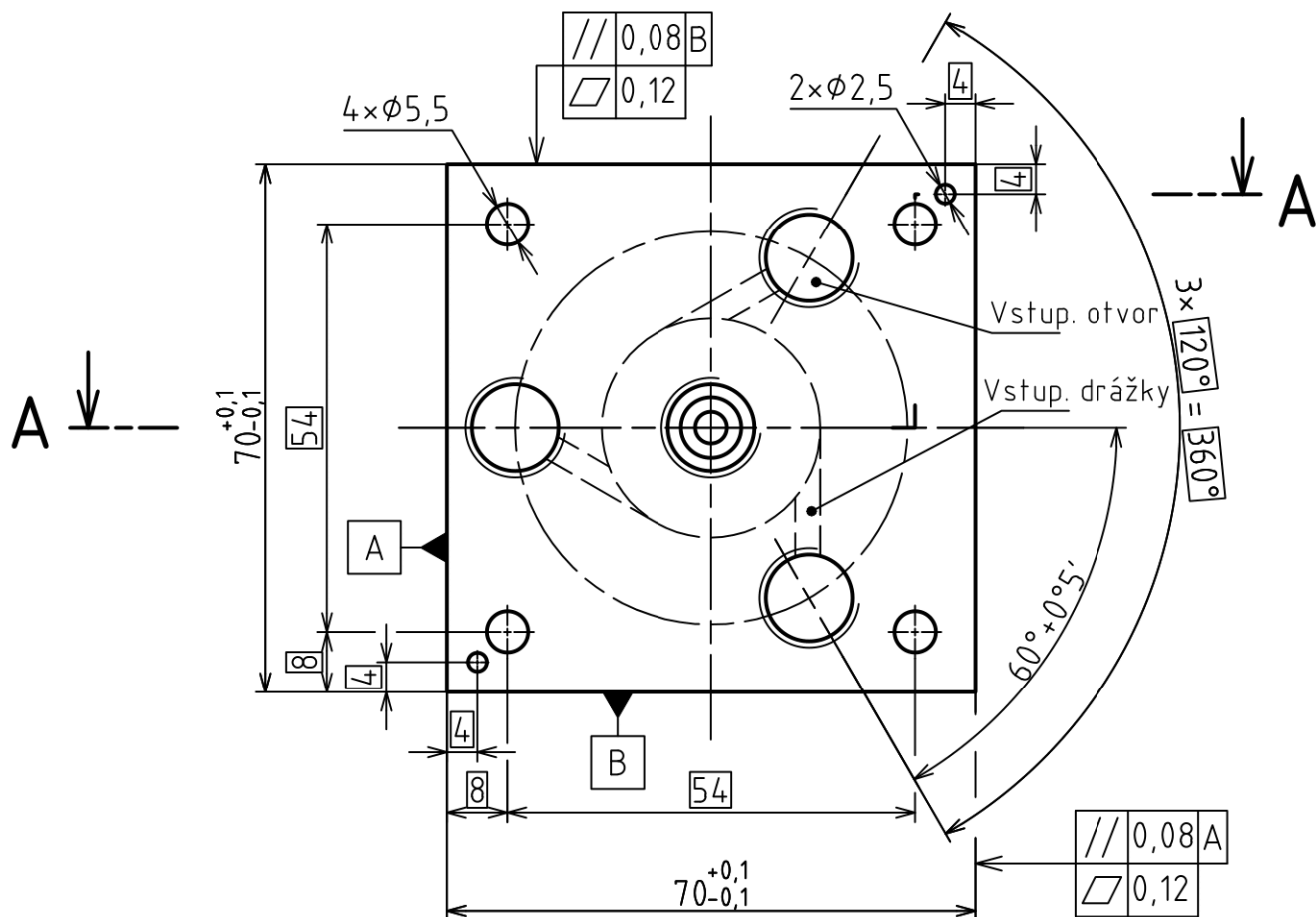
- [16] JANALÍK, J. Měření turbulentních fluktuací rychlosti [online]. Ostrava 2006 [vid. 2016-04-28]. Dostupné z <http://www.338.vsb.cz/PDF/Janalik-Mereniturflukrychlosti.pdf>
- [17] *Interference* [online], poslední aktualizace 25.2 2016 14:53 [vid. 2016-04-28], Wikipedie. Dostupné z <https://cs.wikipedia.org/wiki/Interference>
- [19] *LDA and PDA Reference Manual*. Dantec Dynamics, 1st edition, 2011.
- [20] RAFFEL, M. et al. *Particle Image Velocimetry: A Practical Guide*. Springer, 2nd edition, 2007. 460 p. ISBN 978-3-540-72307-3.
- [21] ADRIAN, R. J. – WESTERWHEEL, J. *Particle Image Velocimetry*. Cambridge University Press, 2011. 584 p. ISBN 978-0521440080.
- [22] HORVAY, M. – LEUCKEL, W. *Experimental and Theoretical Investigation of Swirl Nozzles for Pressure-Jet Atomization*. 1986
- [23] RASHID, M. S. F. M. – HAMID, A. H. A. – SHENG, O. C. – GHAFAR, Z. A. *Effect of Inlet Slot Number on the Spray Cone Angle and Discharge Coefficient of Swirl Atomizer*. Procedia Engineering. 2012. Vol. 41, p. 1781-1786. Dostupné z <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S187770581202783X>
- [24] COOPER, D. – YULE, A. J. *Waves on the Air Core/Liquid Interface of a Pressure Swirl Atomizer*. 17th Institute for Liquid Atomization and Spray Systems, 2001
- [25] Feggeler, D. – Landwehr, F. – Walzel, P. *Experimental investigation of sheet parameters via PIV – Comparison of Different in Practice, Most Commonly Used Nozzle Geometries*. ICLASS, 2006
- [26] BEZDĚK, Filip. *Výroba plexisklového soklu pro gramofon.: Diplomová práce*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2008. 54s., 12s příloh. Ing. Milan Kalivoda

Seznam použitých symbolů a zkratk

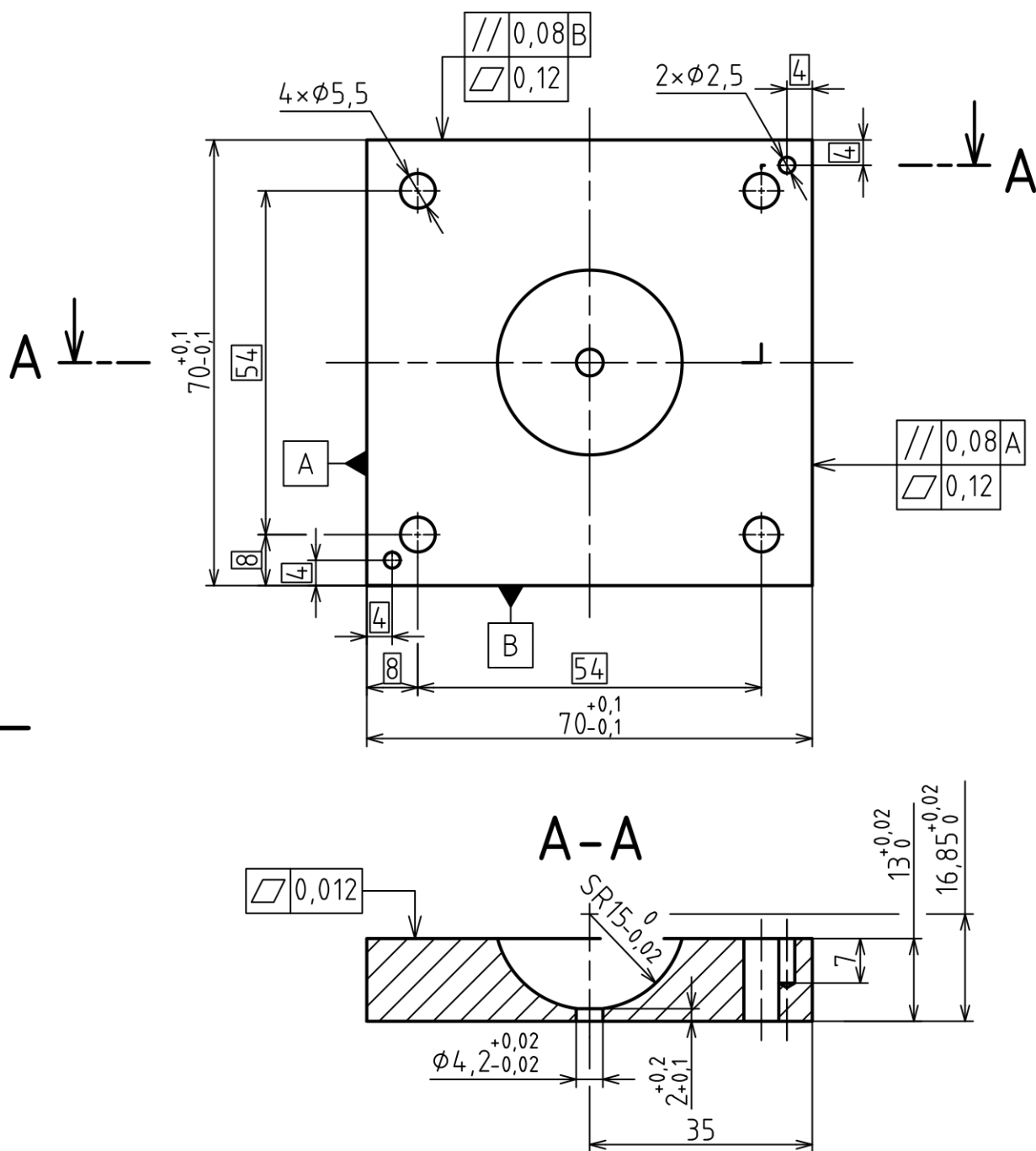
Symbol	Rozměr	Veličina
A	$[m^2]$	Plocha povrchu
c	$[m \cdot s^{-1}]$	Rychlost světla
dn	$[m]$	Výška elementárního hranolku
E_A	$[J]$	Povrchová energie
e_i	$[-]$	Vektor přicházejícího světla
e_s	$[-]$	Vektor odraženého světla
e_1, e_2	$[-]$	Vektory přicházejícího světla
F	$[N]$	Síla
f_D	$[Hz]$	Frekvence světla na přijímači
f_i	$[Hz]$	Frekvence světla zářiče
f_s	$[Hz]$	Frekvence světla na přijímači
l	$[m]$	Délka povrchu
m_k	$[kg]$	Hmotnost kapaliny
n_1, n_2	$[-]$	Index prostředí
n_{21}	$[-]$	Relativní index lomu
Q	$[m^3 \cdot s^{-1}]$	Průtok kapaliny
R	$[m]$	Vzdálenost okraje trysky od osy
Re	$[-]$	Reynoldsovo číslo
r_0	$[m]$	Poloměr výtokového otvoru
U	$[m \cdot s^{-1}]$	Rychlost částice
u_0	$[-]$	Axiální složka rychlosti
V_k	$[m^3]$	Objem kapaliny
w_i	$[m \cdot s^{-1}]$	Rychlost kapaliny
α	$[^\circ]$	Úhel dopadu
α'	$[^\circ]$	Úhel odrazu
β	$[^\circ]$	Úhel lomu
λ_i, λ_l	$[-]$	Vlnová délka
μ	$[kg \cdot m^{-1} s^{-1}]$	Dynamická viskozita
ν	$[m^2 \cdot s^{-1}]$	Kinematická viskozita
ρ_k, ρ	$[kg \cdot m^{-3}]$	Hustota kapaliny
σ	$[J \cdot m^{-1}]$	Povrchové napětí
τ	$[Pa]$	Tečné napětí
Zkratka	Význam	
ABS	Akrylonitrilbutadienstyren	
LDA	Laserová Dopplerovská anemometrie	
PDA	Fázová Dopplerovská anemometrie	
PIV	Particle Image Velocimetry	

Seznam příloh

Příloha 1	Výkres sestavy trysky
Příloha 2	Výkres spodní části trysky – komora
Příloha 3	Výkres střední části trysky – 3 vstupy
Příloha 4	Výkres horní části trysky – víko s přívody
Příloha 5	Výkres střední části trysky – 4 vstupy

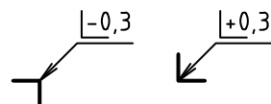


Příloha 1		Hrany:	Měřítko 1:1	Přesnost ISO 2768-mK
				Tolerování ISO 8015
				Promítání
Materiál	Polotovary	Hmotnost	kg	CHRÁNĚNO PODLE ISO 16016
ENERGETICKÝ ÚSTAV	Druh dokumentu	VÝKRES SESTAVY		
	Kreslil	SAPÍK MARCEL		
	Schválil			
	Datum vydání	2016-04-18		
		Název	Tryska	
		Číslo dokumentu	Tryska_konvex_Final	



Příloha 2

Hrany:



Měřítko

1:1

Přesnost ISO 2768-mK

Tolerování ISO 8015

Promítání



Materiál

Polotovár

Hmotnost

kg

CHRÁNĚNO PODLE ISO 16016

ENERGETICKÝ ÚSTAV

Druh dokumentu VÝKRES SOUČÁSTI

Kreslil SAPÍK MARCEL

Schválil

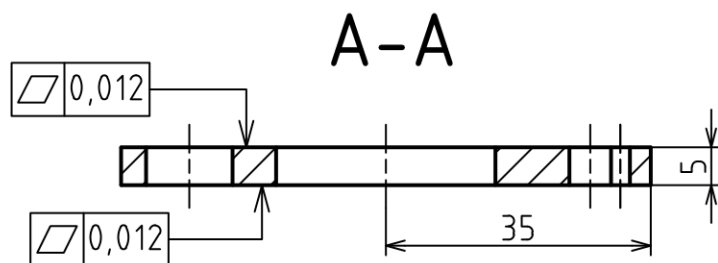
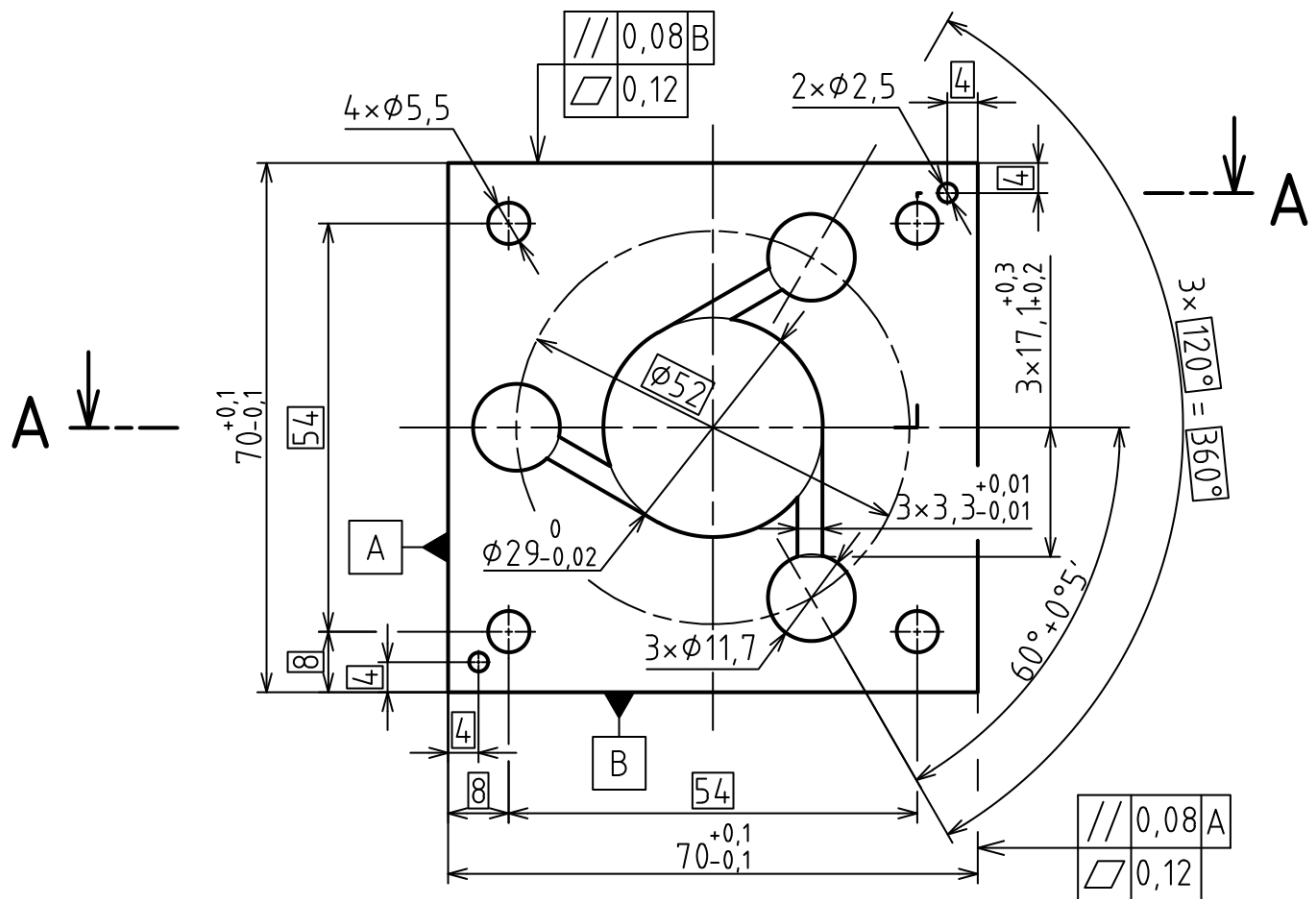
Datum vydání 2016-04-18

Název

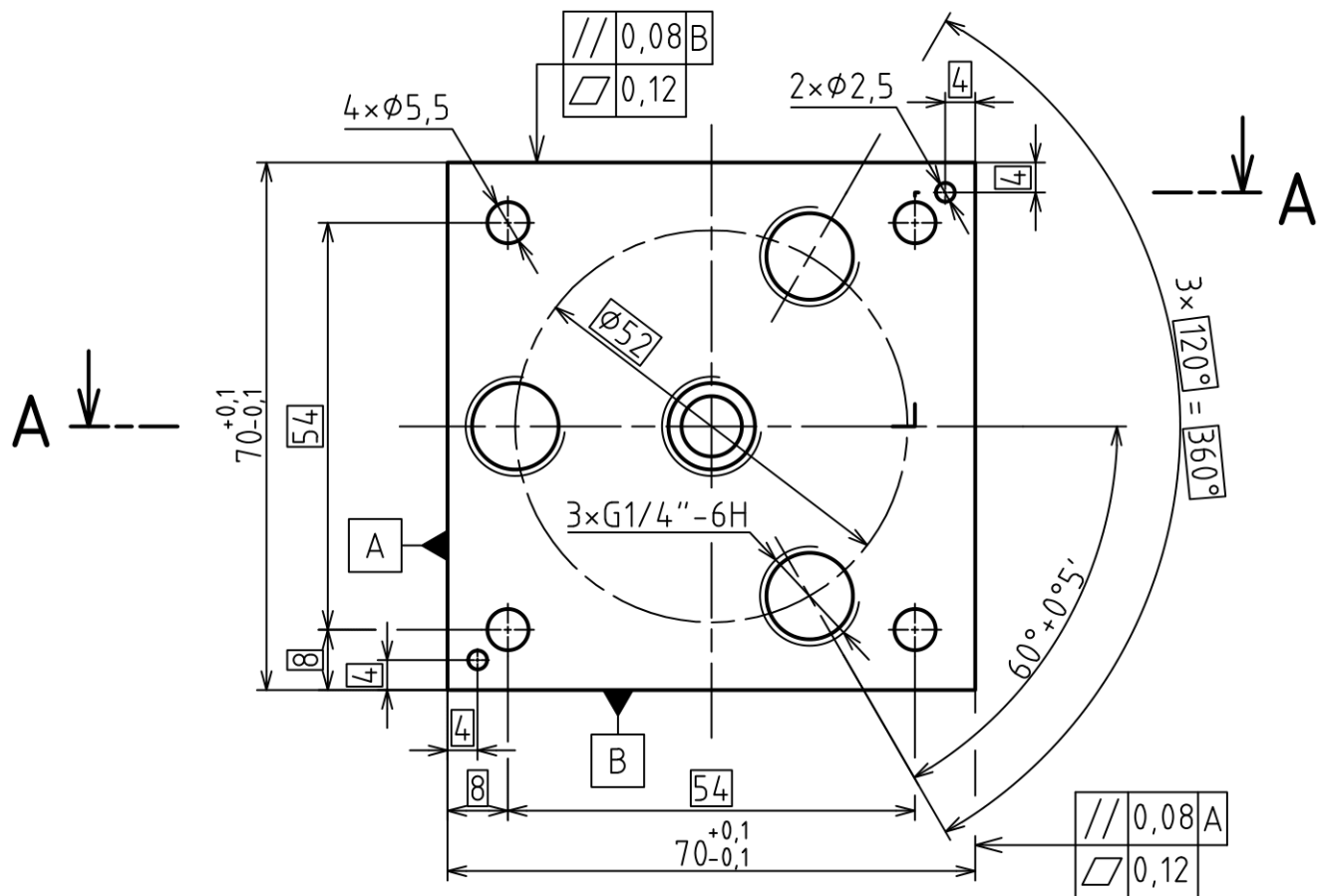
Tryska-Spodní_díl

Číslo dokumentu

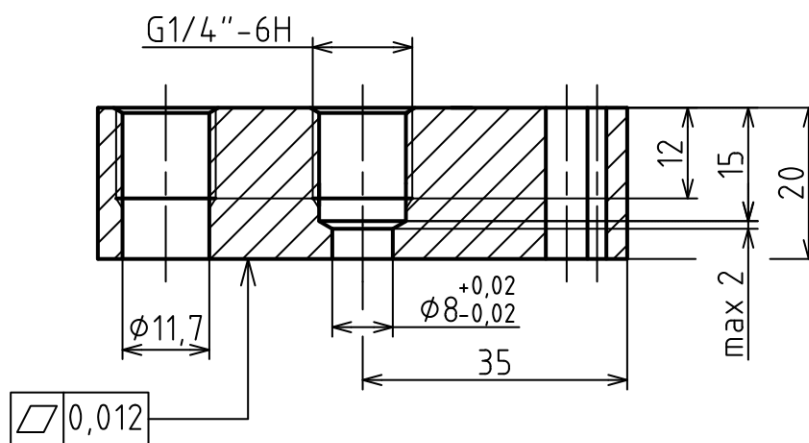
Tryska_konvex_1



Příloha 3		Hrany: $\sqrt{\text{ }}$ -0,3 $\sqrt{\text{ }}$ +0,3	Měřítko 1:1	Přesnost ISO 2768-mK
				Tolerování ISO 8015
Materiál		Polotovár	Hmotnost kg	Promítání $\sqrt{\text{ }}$
ENERGETICKÝ ÚSTAV		Druh dokumentu VÝKRES SOUČÁSTI	Tryska-Střední_díl_3	
		Kreslil SAPIK MARCEL		
		Schválil	Tryska_konvex_2_3	
		Datum vydání 2016-04-18		

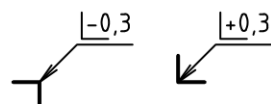


A-A



Příloha 4

Hrany:



Měřítko

1:1

Přesnost ISO 2768-mK

Tolerování ISO 8015

Promítání



Materiál

Polotovár

Hmotnost

kg

CHRÁNĚNO PODLE ISO 16016

ENERGETICKÝ ÚSTAV

Druh dokumentu VÝKRES SOUČÁSTI

Kreslil SAPIK MARCEL

Schválil

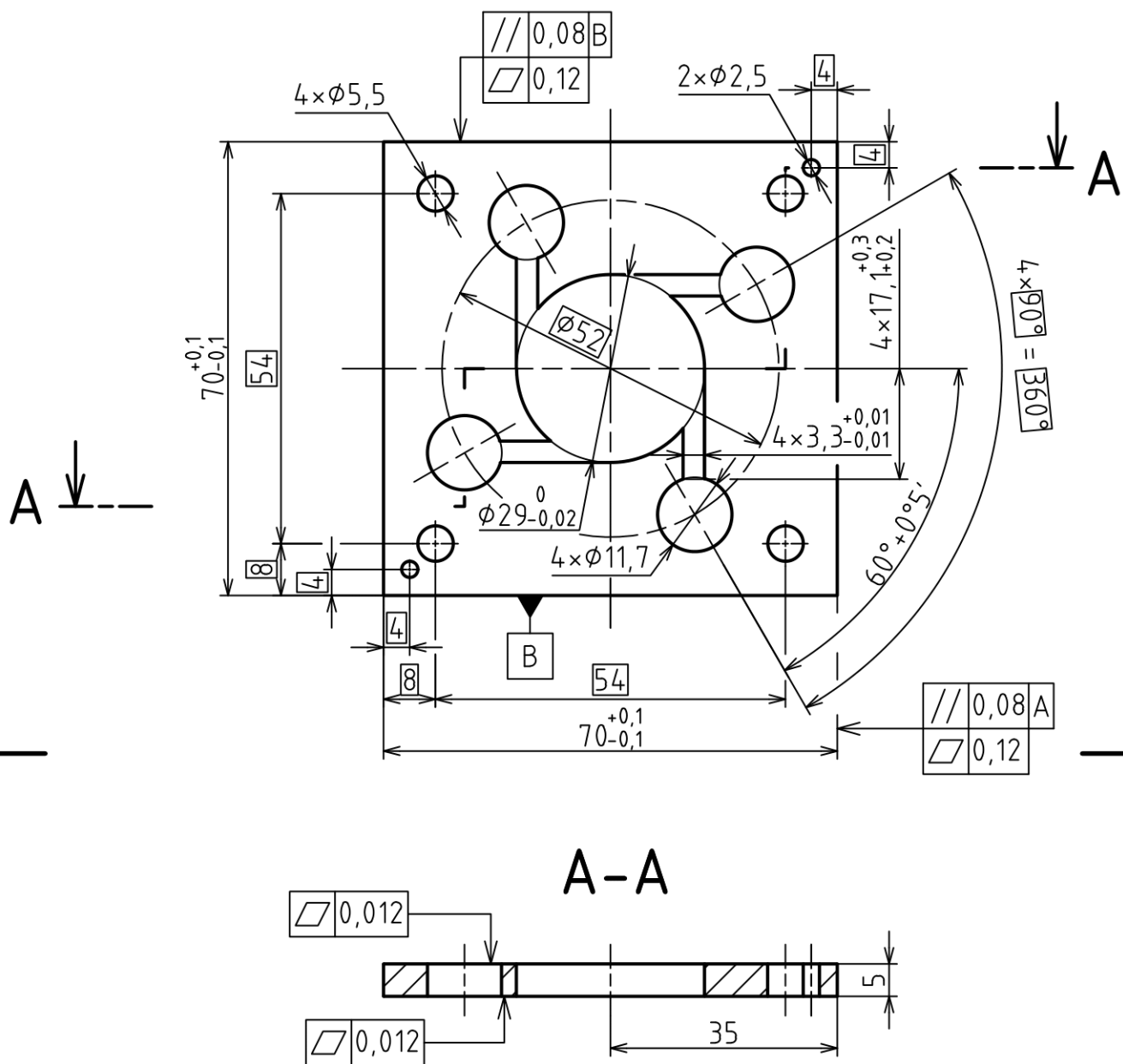
Datum vydání 2016-04-18

Název

Tryska-Vrchní_díl

Číslo dokumentu

Tryska_konvex_3_3



Příloha 5		Hrany: $\begin{matrix} \swarrow & \searrow \\ -0,3 & +0,3 \end{matrix}$	Měřítko 1:1	Přesnost ISO 2768-mK
				Tolerování ISO 8015
				Promítání
Materiál	Polotovár	Hmotnost	kg	CHRÁNĚNO PODLE ISO 16016
ENERGETICKÝ ÚSTAV	Druh dokumentu	Název Tryska-Vstupy		
	Kreslil			
	Schválil	Číslo dokumentu Tryska_konvex_2_4		
	Datum vydání			

